

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	Siberian Snake電磁石を用いた偏極陽子ビーム加速の研究
Title(English)	
著者(和文)	高野淳平
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第6844号, 授与年月日:2007年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第6844号, Conferred date:2007/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文

Siberian Snake 電磁石を用いた  
偏極陽子ビーム加速の研究

指導教官 服部 俊幸 教授

東京工業大学大学院

理工学研究科 原子核工学専攻

高野 淳平

# 目次

## 第 1 章 序論

1-1	スピン物理研究の概要	p.1
1-2	本研究の目的と概要	p.2
1-3	論文構成	p.4

## 第 2 章 シンクロトロン型加速器とスピン力学

2-1	シンクロトロン型加速器	p.9
2-1-1	メインダイポール電磁石	p.10
2-1-2	弱収束シンクロトロン	p.11
2-1-3	強収束シンクロトロン	p.12
2-2	スピン力学と減偏極共鳴	p.14
2-2-1	偏極度の定義	p.14
2-2-2	変則的 $g$ 因子	p.15
2-2-3	外部電磁場によるスピンの歳差運動	p.16
2-2-4	減偏極共鳴	p.17
2-2-5	Froissart-Stora の公式	p.18

## 第 3 章 BNL の偏極陽子加速器

3-1	偏極イオン源	p.22
3-2	線形加速器	p.25
3-3	Booster 加速器	p.26
3-4	Warm Snake 導入前の AGS 加速器	p.27
3-4-1	Solenoidal Snake	p.30
3-4-2	RF dipole と Vertical intrinsic resonance	p.32
3-4-3	AGS p-C CNI 偏極度計	p.36
3-5	RHIC 衝突型加速器	p.39
3-5-1	RHIC Full Snake	p.40
3-5-2	RHIC 加速器内の偏極度計	p.42
3-5-3	ビーム衝突実験の検出器と Spin rotator 電磁石	p.44

## 第4章 常電導ヘリカルダイポール電磁石

4-1	全体設計	p.50
4-1-1	設計条件	p.50
4-1-2	冷却方式	p.51
4-1-3	インダクタンス	p.54
4-1-4	構造設計	p.54
4-2	磁場計算	p.61
4-2-1	磁場計算コード	p.61
4-2-2	磁場特性曲線	p.62
4-2-3	二次元磁場計算	p.62
4-2-4	三次元磁場計算	p.64
4-3	電磁石の製作	p.70
4-3-1	1/5 スケールモデル	p.70
4-3-2	ヘリカルコイルの巻線	p.72
4-3-3	実機組み立て	p.77
4-3-4	検査および製作誤差	p.82
4-3-5	温度上昇測定	p.82
4-3-6	製作誤差を考慮した三次元磁場計算	p.83

## 第5章 ヘリカルダイポール内の磁場測定

5-1	磁場測定の手法	p.89
5-1-1	ホール素子法	p.89
5-1-2	核磁気共鳴法	p.91
5-1-3	ハーモニックコイル法	p.92
5-2	Warm Snake の磁場測定	p.97
5-2-1	積分磁場測定	p.97
5-2-2	磁場分布測定	p.98
5-2-3	磁場方向測定	p.101
5-2-4	多極磁場成分解析	p.104

## 第 6 章 Siberian Snake を用いた偏極陽子の加速実験

6-1	Warm Snake を用いた偏極陽子ビームの加速実験	p.110
6-1-1	ビーム加速の実験	p.111
6-1-2	Warm Snake のスネーク強度	p.120
6-1-3	スピンチューン	p.121
6-1-4	スピンミスマッチ	p.123
6-1-5	偏極度の測定	p.127
6-1-6	ビーム軌道の最適化	p.130
6-1-7	偏極度のビーム強度依存性	p.136
6-1-8	2005 年までの Figure of Merit の向上	p.139
6-2	2 台の Partial Siberian Snake と偏極陽子の振る舞い	p.141
6-2-1	超伝導ヘリカルダイポール型 Partial Siberian Snake	p.141
6-2-2	Double snake のスピンチューン	p.144
6-2-3	Double snake のスピンミスマッチ	p.150
6-3	2 台の Partial Siberian Snake を用いた加速器実験	p.157
6-3-1	Vertical tune scan	p.157
6-3-2	スピンミスマッチの測定	p.161
6-3-3	2005 年におけるビームランプ時の Raw asymmetry の測定	p.162
6-3-4	Double snake 運転時における 偏極度のビーム強度依存性	p.164
6-3-5	ハーモニクスの補正	p.180
6-3-6	ハーモニクス補正後の Vertical tune scan	p.186
6-3-7	1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転	p.189
6-4	第 6 章のまとめ	p.198

## 第 7 章 今後の展望とまとめ

7-1	3 台の Partial Siberian Snake と偏極陽子の振る舞い	p.203
7-1-1	Triple snake のスピンミスマッチ	p.204
7-1-2	Triple snake のスピンチューン	p.209
7-2	2 台の Cold Snake を用いた加速器運転	p.213
7-2-2	Double Cold Snake のスピンミスマッチ	p.213
7-2-3	Double Cold Snake のスピンチューン	p.214
7-3	日本における偏極陽子ビームの加速および原子核物理実験案	p.215
7-4	まとめ	p.217

謝辞 p.223

## 付録

付録 1	BNL の加速器全体図とアップグレード	p.226
付録 2	初期のヘリカルダイポールの模型	p.228
付録 3	Warm Snake の設計図	p.229
付録 4	Warm Snake の製作過程	p.231
付録 5	Warm Snake の評価	p.234

# 第1章 序論

目次

1-1 スピン物理研究の概要	p.1
1-2 本研究の目的と概要	p.2
1-3 論文構成	p.4
参考文献	p.6

# 第1章 序論

本研究ではスピンの向きが揃った偏極陽子ビームを高い偏極度を維持したまま高エネルギーまで加速する方法について調べるため、加速器内におけるスピンの計算および加速器実験を行った。また、高い偏極度を維持するため螺旋形状の特殊な電磁石の三次元磁場計算、設計および製作を行った。

本章のうち、1-1 ではこの加速器研究の背景にある陽子スピンの起源を調べる原子核物理研究の概要について述べる。1-2 では本研究の目的と概要について述べる。1-3 では論文の構成について述べる。

## 1-1 スピン物理研究の概要

原子を構成する陽子・中性子・電子はスピンを持っていることが知られている。このうち、陽子スピンの起源をその究極的構成要素であるクォーク・グルーオンのレベルから理解することは非常に重要な知見となる。これまで陽子のスピンはアップクォークとダウンクォークのバランスで成り立っていると考えられていた。しかしながら、1980年代後半にヨーロッパ合同素粒子原子核研究機構（CERN）にて European Muon Collaboration (EMC)グループによって行われた偏極ミュオンビームの深非弾性散乱実験からクォークスピンの合計が陽子スピンの12%程度しか担っていないことが示された[1-1, 1-2, 1-3]。この実験結果は「Proton Spin Crisis」[1-2]として知られている。陽子スピンは1/2であり、等式(1-1-1)が成り立つ。

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g \quad (1-1-1)$$

ここで、 $\Delta\Sigma$ はクォークスピンの合計であり、 $\Delta G$ はグルーオンスピンの合計、 $L_q$ および $L_g$ はクォークとグルーオンの軌道角運動量の陽子スピンへの寄与である。この陽子スピンの謎を解くため、グルーオンスピンの陽子スピンへの寄与 $\Delta G$ がどの程度あるのか詳細に調べる必要がある。そのためには図1-1-1のようにスピンの向きを揃えた（偏極した）陽子ビームを高エネルギーまで加速し、偏極陽子ビーム同士を正面衝突させ、弾性散乱実験を行う必要がある。この案は1992年当時、米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）において建設計画があった Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) 加速器[1-4,

1-5, 1-6, 1-7]を用いて実験を行うことが提案された。この計画ではビーム衝突点に建設された PHENIX[1-8, 1-9]や STAR[1-10]などの検出器によって  $W$  ボゾン、 $Z$  ボゾン、光子、ジェットの非対称性を測定し、 $W$  ボゾンのパリティの破れから、個別のフレーバーを測定することで偏極陽子内のクォークの偏極度を測定し、ダイレクト光子を測定することでグルーオンの偏極度を測定することが可能である。高精度の実験結果を得るために、偏極陽子ビームの加速における目標値は衝突エネルギー  $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$ 、陽子ビームの偏極度  $P = 70\%$ 、ビーム輝度  $L = 2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  と設定され、この目標を達成するべくこれまで多くの新しい技術が導入されてきた[1-5, 1-6, 1-7]。

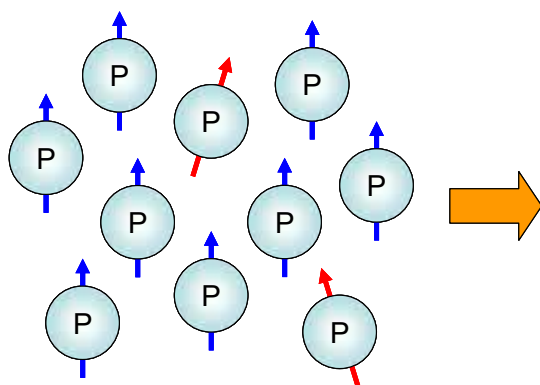


図 1-1-1 : 偏極陽子ビーム (偏極度  $P=80\%$ )

## 1-2 本研究の目的と概要

RHIC 加速器における偏極陽子ビーム同士の衝突実験の Figure of Merit (FoM) は陽子がビーム進行方向に偏極している場合には式(1-2-1)のように偏極度が4乗で効いてくる。

$$FoM = L \times P^4 \quad (1-2-1)$$

ここで  $L$  はビーム輝度  $\text{pb}^{-1}$  (単位は衝突断面積)、 $P$  は偏極度%である。このように、偏極陽子ビーム同士の衝突実験において偏極度は非常に重要な要素である。

これまで数十 GeV のエネルギーにおいて固定ターゲットを標的とした偏極陽子ビームの実験がアルゴンヌ国立研究所の Zero Gradient Synchrotron (ZGS)[1-11, 1-12]、BNL の Alternating Gradient Synchrotron (AGS)[1-13, 1-14]、高エネルギー加速器研究機構の Proton Synchrotron (PS)[1-15, 1-16]で行われてきた。これらの加速器施設において偏極度が極端に落ちてしまう減偏極共鳴が観測されている。この減偏極共鳴は粒子のスピンのシンク

ロトロン(シンクロトロン)の磁場との相互作用によって偏極陽子のスピンベクトルの向きがバラバラになってしまうことで生じる。

シンクロトロン内では図 1-2-1 に示されているようにスピンベクトルが歳差運動をしながらビームが加速器内を進行している。これはスピン閉軌道と呼ばれている。ビームが加速器リングを 1 周する間にスピンベクトルが歳差運動する回数は  $G\gamma$  回である(第 2 章参照)。ここで、 $G$  は陽子の  $g$  因子から  $G = (g - 2)/2 = 1.7928747$  であり、 $\gamma$  はローレンツ因子である。完全に垂直磁場のみで構成される理想的な円型加速器においては、すべてのスピンベクトルが垂直軸の周りを歳差運動しており、減偏極は起きない。しかしながら、実際の加速器ではダイポール電磁石のミスアライメント、四重極電磁石などによって垂直成分以外の磁場が存在するため減偏極共鳴が生じてしまう(第 2 章参照)。以上のように、シンクロトロンにおいては高い偏極度を維持したまま偏極ビームを高エネルギーまで加速することは非常に困難である。

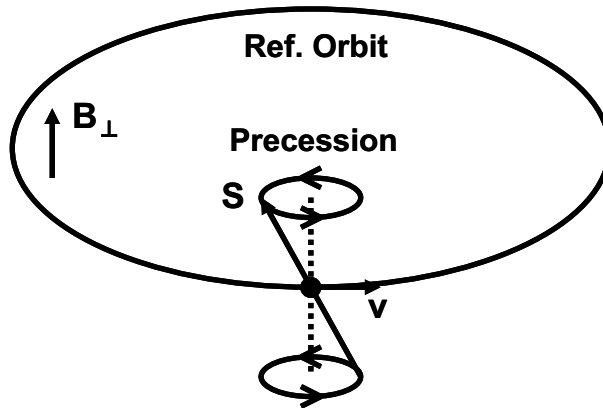


図 1-2-1 : シンクロトロン内におけるスピンベクトルの歳差運動

BNL の AGS 加速器では減偏極共鳴を避けるため、Solenoidal Partial Siberian Snake 電磁石 (Solenoidal Snake, SSNK) [1-17, 1-18] と RF dipole 電磁石[1-19, 1-20, 1-21]が導入されている(第 3 章参照)。これらの電磁石によって AGS 加速器の出射エネルギーにおける平均偏極度は 40%であった。これらの電磁石のうち Solenoidal Snake はその電磁石自体のソレノイド磁場によって新たに別の減偏極共鳴を引き起こしてしまい、偏極度の向上に対する妨げになっていた。この問題を解決するため新たに常電導ヘリカルダイポー

ル型 Partial Siberian Snake 電磁石 (Warm Snake, WSNK) [1-22, 1-23, 1-24, 1-25, 1-26, 1-27, 1-28]を開発・導入した (第 4 章および第 5 章参照)。この Warm Snake の導入および加速器の最適化によって、平均偏極度は 55%を達成した。

その後、AGS 加速器に超伝導ヘリカルダイポール型 Partial Siberian Snake (Cold Snake) [1-28, 1-29, 1-30, 1-31]を導入し、様々な加速器実験や計算結果との比較および考察を行うことで加速器を最適化し、平均偏極度は 65%を達成し、最大偏極度は 73%を記録した。

本論文では以上のように Siberian Snake 電磁石を用いることで如何にして高い偏極を維持したまま偏極陽子ビームを高エネルギーまで加速するかについて計算および実験の両面から比較検討し、考察した結果を述べる。

### 1-3 論文構成

本論文は全 7 章から構成されている。

第 2 章では、シンクロトロン型加速器とビーム力学、加速器内で生じる減偏極共鳴および Siberian Snake の効果について詳しく述べる。

第 3 章では、BNL の偏極陽子加速器の全体構成と偏極陽子ビームの生成および偏極度の測定器などの関連装置について述べる。

第 4 章では、Warm Snake の設計、三次元磁場計算および電磁石の製作過程について述べる。ここでは三次元磁場計算ソフトウェア OPERA-3D / TOSCA[1-32]を用いたヘリカルダイポール内の磁場の最適化およびヘリカルコイルの製作と鉄芯の組み立てについて詳しく述べる。また、完成後の検査結果から製作誤差の考察を行う。

第 5 章では、ヘリカルダイポール内のハーモニックコイル[1-33]を用いた高精度の磁場測定について述べる。ここでは 2 種類のハーモニックコイルを用いて積分磁場とビーム進行軸に対する磁場分布の測定結果を示す。またこれらの磁場測定結果を第 4 章で得られた三次元磁場計算結果との比較および考察を行った。

第 6 章では、Warm Snake を用いた AGS 加速器内の偏極陽子ビームの加速実験について述べる。Warm Snake 導入前後の偏極度の測定結果を比較し、Warm Snake の効果について考察を行う。また、Warm Snake 導入後に新たに開発された超伝導型サイベリアン

スネーク電磁石 (Cold Snake) と Warm Snake の組み合わせ運転 (ダブルスネーク運転) によって得られた偏極度向上について述べる。

第 7 章では、今後の展望として 3 台の異なるタイプのスネーク電磁石を並列運転した場合と 2 台の Cold Snake を同時稼動した場合の AGS 加速器内における偏極陽子ビームの振る舞いについて計算を行い、それぞれの運転パターンのメリットおよびデメリットについて考察を行う。最後に本研究を総括する。

## 参考文献

- [1-1] E. Leader and M. Anselmino, “A crisis in the parton model: where, oh where is the proton’s spin?”, *Z. Phys. C* **41**, 239 (1988)
- [1-2] European Muon Collaboration, “A measurement of the spin asymmetry and determination of the structure function  $g_1$  in deep inelastic muon-proton scattering”, *Phys. Lett. B* **206**, 364 (1988)
- [1-3] The European Muon Collaboration, “An investigation of the spin structure of the proton in deep inelastic scattering of polarized muons on polarized protons”, *Nucl. Phys. B* **328**, 1 (1989)
- [1-4] RHIC web page, <http://www.bnl.gov/RHIC/>
- [1-5] M. Harrison, S. Peggs, and T. Roser, “The RHIC Accelerator” *Annual Rev. Nucl. Part. Sci.* 2002. **52**: 425-69 (2002).
- [1-6] T. Roser, W. W. MacKay, *et al.*,  
Configuration Manual, “Polarized Proton Collider at RHIC”, (1998)
- [1-7] I. Alekssev, *et al.*, “Polarized Proton Collider at RHIC”,  
*Nucl. Inst. and Meth. A* **499**, 392 (2003).
- [1-8] PHENIX web page, <http://www.phenix.bnl.gov/>
- [1-9] PHENIX Design Book, (1997)  
[http://www.phenix.bnl.gov/phenix/project\\_info/design\\_book/design-book.htm](http://www.phenix.bnl.gov/phenix/project_info/design_book/design-book.htm)
- [1-10] STAR web page, <http://www.star.bnl.gov/>
- [1-11] A. V. Raugas, “Synchronization of the Zero Gradient Synchrotron (ZGS) and the Fast-Cycling Booster II Injector”,  
*IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. **NS-24**, No.3, (1977)
- [1-12] T. Khoe, *et al.*, *Part. Accel.* **6**, 213 (1975)
- [1-13] AGS web page, <http://www.bnl.gov/bnlweb/facilities/AGS.asp>
- [1-14] F. Z. Khari, *et al.*, “Acceleration of polarized protons to 22GeV/c and the measurement of spin-spin effects in  $p \uparrow + p \uparrow \rightarrow p + p$ ”, *Phys. Rev. D* **39**, 45 (1989)
- [1-15] PS web page, <http://www-ps.kek.jp/kekps/>

- [1-16] H. Sato, *et al.*, Nucl. Inst. Methods, Phys. Res. Sec A**272**, 617 (1988)
- [1-17] H. Huang, *et al.*, “Preservation of Proton Polarization by a Partial Siberian Snake”,  
Phys. Rev. Lett. **73**, 2982 (1994)
- [1-18] H. Huang, Ph. D. thesis, “Preservation of Polarization of Proton Beam in the AGS with a  
Partial Siberian Snake”, Indiana University (1995)
- [1-19] M. Bai, *et al.*, “Experimental test of coherent betatron resonance excitations”,  
Phys. Rev. **E56**, 5 (1997)
- [1-20] M. Bai, *et al.*, “Overcoming Intrinsic Spin Resonances with an rf Dipole”,  
Phys. Rev. Lett. **80**, 4673 (1998)
- [1-21] M. Bai, Ph. D. thesis, “Overcoming Intrinsic Spin Resonances by using an RF Dipole”,  
Univ. of Indiana (1999).
- [1-22] J. Takano, *et al.*, “Design Study of a Normal Conducting Helical Snake for AGS”,  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. **14**, No.2, 457-460 (2004)
- [1-23] J. Takano, *et al.*, “Field Measurements in the AGS Warm Snake”,  
Proc. 2004 European Particle Accelerator Conference,  
Lucerne, Switzerland, 2113-2115 (2004)
- [1-24] J. Takano, *et al.*, “Optimization of AGS Polarized Proton Operation with the Warm  
Helical Snake”,  
Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, 1003-1005 (2005)
- [1-25] J. Takano, *et al.*, “Helical Dipole Partial Siberian Snake for the AGS”,  
Journal of Instrumentation, **1**, P11002 (2006)
- [1-26] W. W. MacKay, *et al.*, “Status of Proton Polarization in RHIC and AGS”, Proceedings of  
16<sup>th</sup> International Spin Physics Symposium, Trieste, Italy, (2004)
- [1-27] H. Huang, *et al.*, “Acceleration of Polarized Protons in the AGS with a Helical Partial  
Snake”, Proceedings of 16<sup>th</sup> International Spin Physics Symposium, Trieste, Italy, (2004)
- [1-28] A. U. Luccio, “Tracking through a Warm Helical Snake for the AGS”,  
BNL CAD/AP Note 136, January 30, 2004 (2004),  
[http://www.agsrhichome.bnl.gov/AP/ap\\_notes/ap\\_note\\_136.pdf](http://www.agsrhichome.bnl.gov/AP/ap_notes/ap_note_136.pdf)

- [1-29] E. Willen, *et al.*, “Superconducting Helical Snake Magnet for the AGS”,  
Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, 2935-2937 (2005)
- [1-30] H. Huang, *et al.*, “Acceleration of Polarized Protons in the AGS with Two Helical Partial  
Snakes”, Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, 1404-1406 (2005)
- [1-31] H. Huang, *et al.*, “Acceleration of Polarized Protons in the AGS with Two Helical Partial  
Snakes”, Proc. 2006 European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, Scotland,  
273-275 (2006)
- [1-32] Vector Fields Inc., Oxford, UK.
- [1-33] A. Jain, “Harmonic Coils”, Proc. CERN Accelerator School on Measurement and  
Alignment of Accelerator and Detector Magnets, April 11-17, 1997, Anacapri, Italy,  
CERN yellow report 98-05, p. 175. <http://cas.web.cern.ch/cas/>

## 第2章 シンクロトロン型加速器とスピン力学

### 目次

2-1 シンクロトロン型加速器	p.9
2-1-1 メインダイポール電磁石	p.10
2-1-2 弱収束シンクロトロン	p.11
2-1-3 強収束シンクロトロン	p.12
2-2 スピン力学と減偏極共鳴	p.14
2-2-1 偏極度の定義	p.14
2-2-2 変則的 g 因子	p.15
2-2-3 外部電磁場によるスピンの歳差運動	p.16
2-2-4 減偏極共鳴	p.17
2-2-5 Froissart-Stora の公式	p.18
参考文献	p.20

## 第2章 シンクロトロン型加速器とスピニ力学

シンクロトロン型加速器内における偏極陽子ビームの振る舞いは、加速器内で円運動を行うスピンを持つ荷電粒子の磁気モーメントと加速器を構成する電磁場の相互作用で決まる。この相互作用は Thomas-BMT[2-1, 2-2, 2-3]の式で記述される。本章ではシンクロトロン型加速器について述べた後、シンクロトロン型加速器内におけるスピニ力学および減偏極共鳴について述べる。

### 2-1 シンクロトロン型加速器

一般的にビームはイオン源で生成され、線形加速器を用いて数百 MeV まで加速され、円形加速器で GeV または TeV レベルの高エネルギーまで加速される。円形加速器にはサイクロトロン型とシンクロトロン型がある。ここではシンクロトロン型加速器について説明する。シンクロトロンでは電磁石を用いてビームを周回運動させ、繰り返し高周波加速空洞 (RF キャビティ) でビームを加速する。その際、ビームエネルギー向上に合わせて電磁石の磁場および RF キャビティの周波数を同期させる。ここでシンクロトロン型加速器の座標軸を図 2-1-1 に示す。

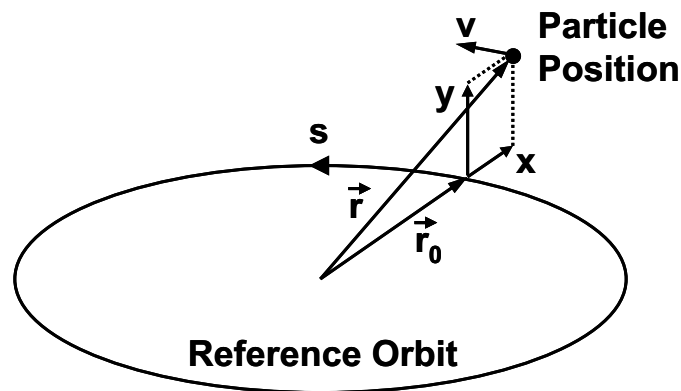


図 2-1-1 : シンクロトロン型加速器の座標軸

加速される粒子は基準軌道 (Reference Orbit) の周りに分布している。図 2-1-1 のように粒子の水平方向の座標軸を  $x$ 、垂直方向の座標軸を  $y$ 、粒子の進行方向の円形座標を  $s$  とする。

## 2-1-1 メインダイポール電磁石

ビームが図 2-1-1 のように円軌道を描くためには  $y$  方向の磁場が必要となる。そのためシンクロトン型加速器を構成する主電磁石として図 2-1-2 に示されている双極（ダイポール）電磁石が用いられている。ダイポール電磁石にはその鉄芯の形状から C 型、H 型、Window Frame（WF）型がある。

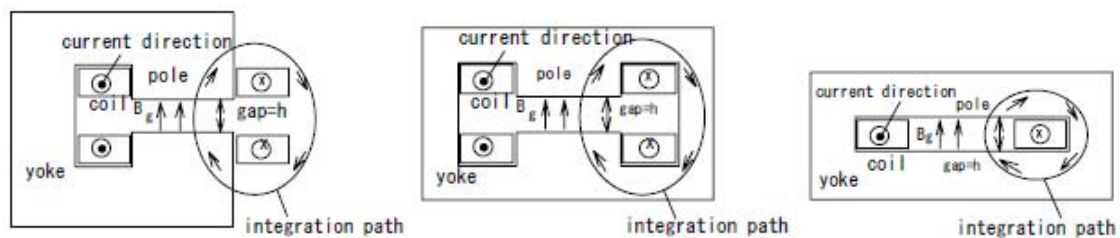


図 2-1-2 : C 型電磁石 (左)、H 型電磁石 (中央)、WF 型電磁石 (右)

C 型電磁石はリターンヨークが片側のみであるため、磁極間の磁場が乱れやすい。また、磁極間に強い磁場を発生させるとき、その磁気力によって磁極間隙の距離に変化が生じてしまう。ただし、C 型電磁石では磁極間へのアクセスが容易であるため、高い磁場を要求されない実験で用いられることが多い。

H 型電磁石は両側にリターンヨークがあり、水平・垂直方向に対し対称な形状であるため磁極間の磁場の対称性が良い。また、磁極間に高い磁場を発生させる場合でも磁極間隙の距離の変化は少なく、この変形による磁場への影響は少ない。

WF 型電磁石は C 型電磁石および H 型電磁石と異なり、ポールを持たない形状になっているため、磁場の一様性が非常に優れている。また、鉄芯内の磁力線の integration path が小さいため、鉄芯の体積が小さく済む。しかしながら、WF 型電磁石では H 型や C 型のようにソレノイド型コイルを用いるとビームパイプを通すスペースがなくなってしまう。そのため WF 型電磁石では図 2-1-3 に示されているように、コイル折り返し形状を鞍のようにし、ビームが通るスペースを確保している。したがって、コイルの製作に関しては H 型および C 型に比べて工程が多い。

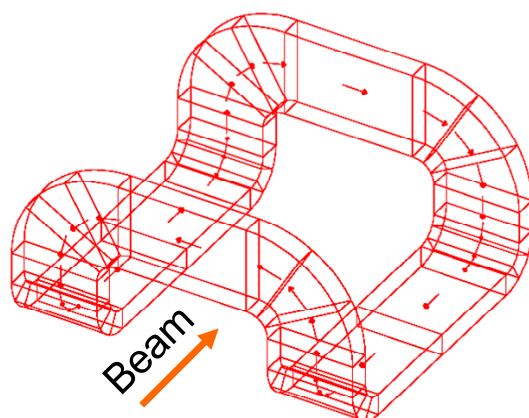


図 2-1-3 : WF 型電磁石用鞍型コイル

以上のダイポール電磁石をシンクロトロン型加速器内のビームが円軌道を保つようにビームのエネルギーに同期させて磁場の強さを変化させることで高エネルギーまでビームを加速することができる。

## 2-1-2 弱収束シンクロトロン

ビームは内の粒子は同じ電荷をもつため反発し合い、基準軌道から大きく外れる粒子が出てくる。しかしながら、垂直方向に一様な磁場  $B_y$  しかもっていない場合、垂直方向に基準軌道から大きく外れた粒子を元に戻すことができない。そこでシンクロトロンのメインダイポールを図 2-1-4 のような磁極形状にし、わずかに水平方向の磁場  $B_x$  を発生させることで垂直方向にビームを収束することが可能となる。これを弱収束法と呼ぶ。

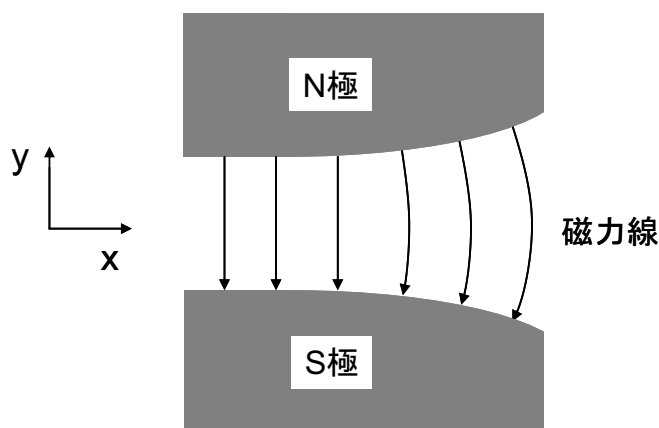


図 2-1-4 : 弱収束電磁石

この弱収束電磁石は磁極間隙が広い領域では  $B_y$  成分が弱くなるため、ビームが水平方向に曲げられる力が弱い。したがって、弱収束電磁石内をビームが通った場合、各粒子の水平方向への軌道の変化は異なる。この磁極間隙の広い領域を加速器リングの内側と外側に交互に配置することで水平方向のビームを収束することができる。このようにビームは水平および垂直方向に収束を繰り返すことで波形軌道を描く。これをベータatron振動と呼ぶ。以上のように弱収束法を用いた場合、一体の弱収束電磁石で水平および垂直方向のビーム収束を同時に行うことができる。しかしながら、この収束法ではビームサイズを小さく保つには不十分であり、ビーム強度を高く維持するためには粒子がビームパイプの内側に当たらないようにするためビームパイプの直径を大きくする必要があった。したがって、磁極間隙は大きくなり、強い磁場を得ることが困難となる。この弱収束法ではビーム加速に必要な磁場を得るため、電磁石のサイズが非常に大きくなってしまったという問題があった。この問題を解決するために発明された方法が次に述べる強収束法である。

### 2-1-3 強収束シンクロトロン

極性の異なる四重極電磁石を交互に配置することで強い収束力を得る方法が 1949 年にギリシャの技師 N. Christofilos および 1952 年に BNL の E. D. Courant、M. S. Livingston、H. Snyder によって独立に発明された。[2-4] 図 2-1-5 に四重極電磁石を示す。また、この四重極電磁石によって粒子が受ける力を図 2-1-6 に示す。

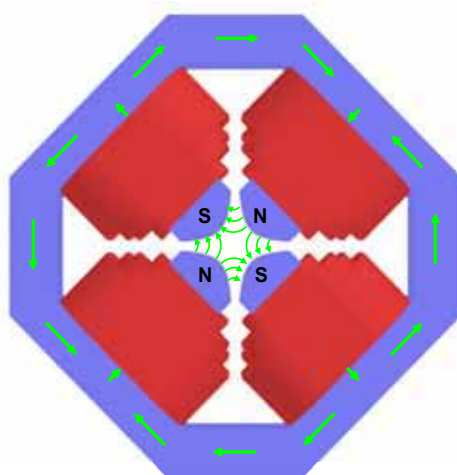


図 2-1-5 : 四重極電磁石

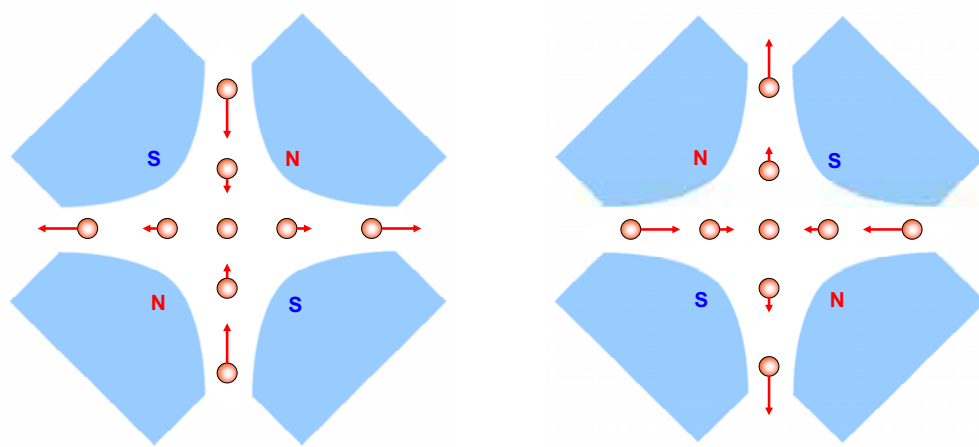


図 2-1-6 : 四重極電磁石によって粒子が受ける力

四重極電磁石が図 2-1-6 の左図の極性のとき、粒子は垂直方向に収束し、水平方向に発散する。図 2-1-6 の右図の極性のときは垂直方向に発散し、水平方向に収束する。これらの極性の異なる四重極電磁石を交互に配列することで、ビームの受ける積分収束力は積分発散力を上回り、ビームサイズを小さく保つことが可能となる。したがって、シンクロトロンメインダイポールのサイズを小さくすることができる。図 2-1-7 は 1950 年代に BNL で稼動していた弱収束型シンクロトロンの Cosmotron 加速器と現在 BNL で稼動している AGS 加速器のメインダイポールのサイズの比較である。

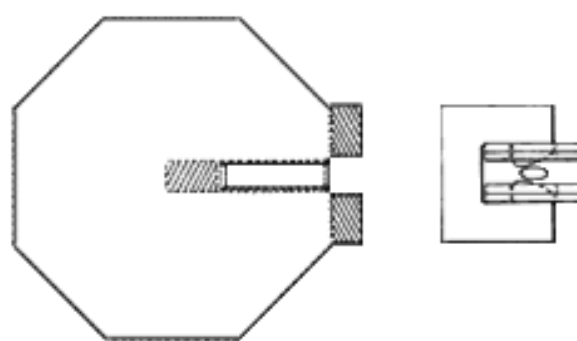


図 2-1-7 : Cosmotron 加速器（弱収束）と AGS 加速器（強収束）のメインダイポール

このように強収束型シンクロトロンではメインダイポールのサイズを飛躍的に小さくすることができる。また、四重極電磁石によってビームサイズを高エネルギーまで小さく

く保つことが可能となるため、到達可能なビームエネルギーの上限が上がる。Cosmotron 加速器では最大ビームエネルギーが 3.3GeV であったが、AGS 加速器ではその 10 倍の 33GeV までビームの加速が可能である。

強収束シンクロトロンの場合、ビームに対する収束効果が強いため、ビームが加速器リングを一周する間に起きるベータトロン振動が多くなる。図 2-1-8 に水平および垂直方向のベータトロン振動を示す。

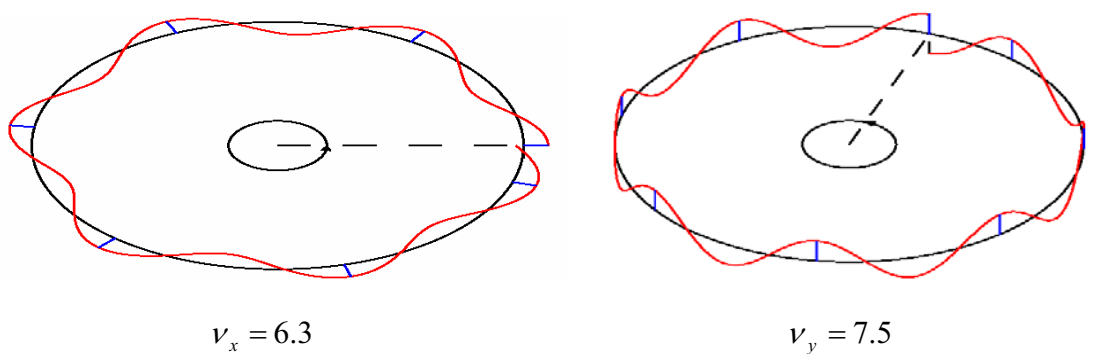


図 2-1-8 : 水平方向のベータトロン振動 (左図) と垂直方向のベータトロン振動 (右図)

シンクロトロンはこのベータトロン振動数が非整数になるように運転する必要がある。これは加速器を構成する磁場のエラーがビームに影響を及ぼさないようにするためである。もし、ベータトロン振動数を整数にした場合、毎週ビームが同じところで同じ磁場のエラーを受けてしまうため、エラーの影響が蓄積されてしまいビームが消滅してしまう。このベータトロン振動は次に説明する減偏極共鳴に関わる重要な変数のひとつである。

## 2-2 スピン力学と減偏極共鳴

本節ではシンクロトロン内における偏極陽子の振る舞いを数式で表し、減偏極共鳴が起きる原因について述べる。

### 2-2-1 偏極度の定義

スピンベクトルが 1/2 の粒子の集まりにおいてはスピンの向きが上向きのもものと下向

きのものがある。この上向きと下向きのスピンを区別するため、ビームの偏極度は式(2-2-1)のように表される。

$$P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \quad (2-2-1)$$

ここで、 $N_+$ はスピンの上向きの粒子数、 $N_-$ はスピンの下向きの粒子数である。ビーム内のスピンの向きが全て同じ向きを向いている場合、偏極度  $P$  は 100% となる。

## 2-2-2 変則的 $g$ 因子

粒子のスピンの  $\vec{S}$  と磁気モーメント  $\vec{\mu}$  の関係を式(2-2-2)に示す。

$$\vec{\mu} = g \frac{q}{2m_q} \vec{S} \quad (2-2-2)$$

ここで、 $g$  は磁気回転比、 $q$  は電荷、 $m_q$  は静止系における粒子の質量である。完全なディラック粒子の場合  $g=2$  であるが、実際には  $g$  は粒子によって変則的である。この粒子ごとに異なる  $g$  因子を考慮した磁気回転比  $G$  は

$$G = \frac{g-2}{2} \quad (2-2-3)$$

と表される。表 2-2-1 にいくつかの粒子についての変則的  $g$  因子および  $G$  を示す。

表 2-2-1 : 各粒子の変則的  $g$  因子および  $G$

	$g$	$G$
Electron ( $e$ )	2.002319	$1.1159652 \times 10^{-3}$
Muon ( $\mu$ )	2.002332	$1.1165924 \times 10^{-3}$
Proton ( $p$ )	5.585695	1.7928474
Deuteron ( $D$ )	1.714024	-0.1429878

本研究では偏極陽子ビームの加速がテーマであるため、以後  $G=1.7928474$  として議論する。

### 2-2-3 外部電磁場によるスピンの歳差運動

粒子の静止系においてスピンの外部から磁場  $\vec{B}$  を受けるときスピンのベクトル  $\vec{S}$  との相互作用は

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (2-2-4)$$

と表される。粒子が動いているとき、式(2-2-4)を粒子の静止系から実験室系へローレンツ変換を行うと

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \frac{q}{\gamma m} \vec{S} \times \left[ (1 + G\gamma) \vec{B}_\perp + (1 + G) \vec{B}_\parallel + \left( G\gamma + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{E} \times \vec{\beta}}{c} \right] \quad (2-2-5)$$

となる。これは Thomas-BMT 方程式と呼ばれている。ここで  $q$  は電荷、 $m$  は静止系の粒子質量、 $\vec{B}_\parallel$  および  $\vec{B}_\perp$  は粒子速度が  $\vec{\beta}c$  のときの実験室系における粒子の進行方向 (Longitudinal 方向) の磁場と粒子の進行方向に対して垂直な面 (Transverse 方向) の磁場である。また  $\gamma$  は相対的ローレンツ因子である。この Thomas-BMT 方程式は一般的な外部電磁場によってどのようにスピンの回転するかについて表している。円形加速器内における電荷を持つ粒子のスピンの振る舞いを検討するため、粒子の運動系をサイクロトロン周波数で粒子が回転する系に変換すると、式(2-2-5)は式(2-2-6)のように変換される。

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \frac{q}{\gamma m} \vec{S} \times \left[ G\gamma \vec{B}_\perp + (1 + G) \vec{B}_\parallel + \left( G\gamma - \frac{\gamma}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{E} \times \vec{\beta}}{c} \right] \quad (2-2-6)$$

円形加速器の磁場  $\vec{B}$  が理想的に  $\vec{B} = B_y \hat{y}$  のように垂直磁場のみを持つときのスピンの歳差運動の周波数を  $\omega_{sp}$  は

$$\omega_{sp} = \frac{q}{\gamma m} (1 + G\gamma) B_y \quad (2-2-7)$$

となる。スピンを持つ粒子がサイクロトロン運動している系に変換すると、スピンの歳差運動の周波数は

$$\omega_{sp} - \Omega_c = \frac{q}{\gamma m} G\gamma B_y \quad (2-2-8)$$

となる。ここで  $\Omega_c$  はサイクロトロン周波数で

$$\Omega_c = -\frac{q}{\gamma m} \vec{B}_y \quad (2-2-9)$$

である。したがって、スピンベクトルの歳差運動は粒子が円形加速器を1周する間にスピンの歳差運動は粒子の円運動の  $G\gamma$  倍だけ回転する。これをスピントーション  $\nu_{sp}$  と呼ぶ。

$$\nu_{sp} = \frac{\omega_{sp} - \Omega_c}{\Omega_c} = G\gamma \quad (2-2-10)$$

図 2-2-1 に円形加速器内の  $\nu_{sp} = 6$  のときのスピンの歳差運動の様子を示す。

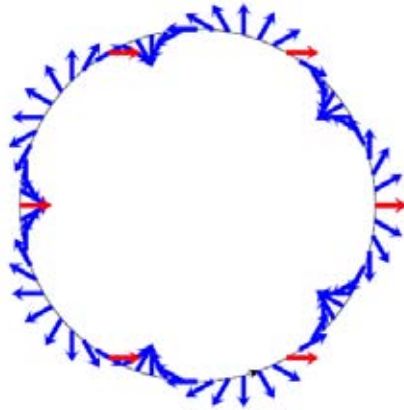


図 2-2-1：円形加速器内のスピンの歳差運動の振る舞い

#### 2-2-4 減偏極共鳴

円形加速器は実際にはメインダイポールや四重極電磁石の設置誤差がある。そのため、粒子が円形加速器を1周する間のスピンの歳差運動が整数倍になるビームエネルギーのとき、スピンベクトルは同じところで同じ磁場のエラーを毎週受けてしまい、集団的粒子内のスピンの向きがバラバラになってしまい、偏極度が落ちてしまう。この減偏極共鳴を Imperfection resonance と呼び、発生条件は

$$\nu_{sp} = G\gamma = n \quad (n \text{ は整数}) \quad (2-2-11)$$

である。

次に強収束シンクロトロンにおいて原理的に必ず生じる減偏極共鳴について述べる。前節で述べたようにこの方式の加速器では四重極電磁石を用いて垂直方向にビームを

収束している。このビームの収束効果によって引き起こされる減偏極共鳴を Vertical intrinsic resonance と呼び、発生条件は

$$\nu_{sp} = G\gamma = kP \pm \nu_y \quad (2-2-12)$$

と表される。ここで、 $k$ は整数、 $P$ は加速器を構成する電磁石群の数、 $\nu_y$ は垂直方向のベータトロンチューンである。

また、円形加速器内にて水平および垂直方向のベータトロン振動のカップリングがある場合、Vertical intrinsic resonance による減偏極効果において水平方向のベータトロンチューン  $\nu_x$  も考慮する必要がでてくる。この減偏極共鳴を Transverse coupling resonance と呼び、発生条件は

$$\nu_{sp} = G\gamma = kP \pm \nu_x \quad (2-2-13)$$

と表される。

## 2-2-5 Froissart-Stora の公式

個々の減偏極共鳴における共鳴前後の偏極度の比は Froissart-Stora の公式[2-5]で得ることができる。共鳴前の偏極度を  $P_i$  および共鳴後の偏極度を  $P_f$  としたときこの公式は

$$\frac{P_f}{P_i} = 2 \exp\left(-\frac{\pi|\varepsilon|}{2\alpha}\right) - 1 \quad (2-2-14)$$

ここで  $\varepsilon$  は共鳴の強さ、 $\alpha$  は加速レートであり、

$$\alpha = \frac{\Delta(G\gamma)}{2\pi} \quad (2-2-15)$$

と表される。共鳴点を  $\alpha \gg |\varepsilon|^2$  のように速く通過した場合、 $P_f/P_i \approx 1$  となり減偏極はほとんど生じない。逆に共鳴点を  $\alpha \ll |\varepsilon|^2$  のようにゆっくり通過した場合、 $P_f/P_i \approx -1$  となり偏極の向きは上下反転する。これらのケースの中間の加速レートの場合、 $P_f/P_i$  が中途半端な値になってしまい、減偏極が生じてしまう。図 2-2-2 に加速レートを変化させたときのスピンの垂直成分の変化についての計算結果を示す。

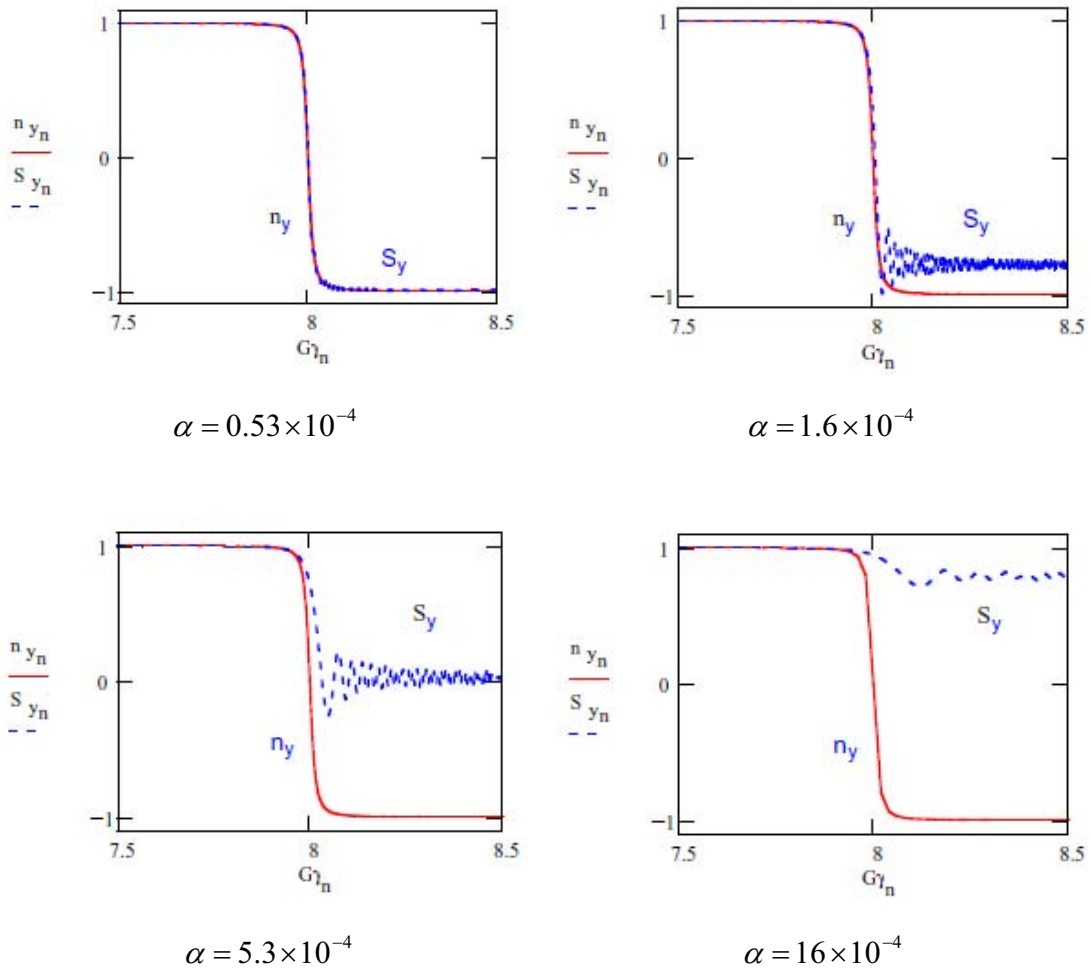


図 2-2-2: スピンの垂直成分と加速レート

このように、加速レートを遅くすることで著しい減偏極を起こさずにスピンの向きがフリップしていることがわかる。逆に加速レートを  $\alpha = 16 \times 10^{-4}$  にまで上げた場合、スピンの向きはフリップせずにいるが、減偏極が生じてしまっている。したがって、減偏極共鳴による減偏極効果を弱めるためには加速レートを遅くすることが望ましいことがわかる。

## 参考文献

- [2-1] L. H. Thomas, “Kinematics of an Electron with an Axis”, *Phil. Mag.* **3**, 1 (1927)
- [2-2] J. Frenkel, “Die Elektrodynamik des Rotierenden Elektrons”,  
*Z. Physik.* **A37**, No. 4-5, 243 (1926).
- [2-3] V. Bargmann, L. Michel, and V. L. Telegdi, “Precession of the Polarization of Particles Moving in a Homogeneous Electromagnetic Field”, *Phys. Rev. Lett.* **2**, 435 (1959)
- [2-4] E. D. Courant, M. S. Livingston, and H. Snyder, *Phys. Rev.* **88**, 1190 (1952)
- [2-5] M. Froissart, and R. Stora, “Depolarisation d'un faisceau de protons polarises dans un synchrotron”, *Nucl. Inst. Meth.* **7**, 297 (1960)

## 第3章 BNLの偏極陽子加速器

### 目次

3-1	偏極イオン源	p.22
3-2	線形加速器	p.25
3-3	Booster 加速器	p.26
3-4	Warm Snake 導入前の AGS 加速器	p.27
	3-4-1 Solenoidal Snake	p.30
	3-4-2 RF dipole と Vertical intrinsic resonance	p.32
	3-4-3 AGS p-C CNI 偏極度計	p.36
3-5	RHIC 衝突型加速器	p.39
	3-5-1 RHIC Full Snake	p.40
	3-5-2 RHIC 加速器内の偏極度計	p.42
	3-5-3 ビーム衝突実験の検出器と Spin rotator 電磁石	p.44
	参考文献	p.47

### 第3章 BNLの偏極陽子加速器

本章ではBNLにおける偏極陽子加速器の構成について述べる。この加速器は偏極イオン源、線形加速器、Booster シンクロトロン加速器、Alternating Gradient Synchrotron (AGS) 加速器、および Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) 加速器で構成されている。これらの加速器で陽子ビームは100GeVまで加速され、互いに正面衝突する。また、偏極度を維持するために用いられる Siberian Snake 電磁石および RF dipole 電磁石や偏極度を測定する偏極度計など偏極陽子ビームの加速実験に必要な装置も導入されている。これらの説明を行った上で、Warm Snake 導入前の AGS 加速器の問題点について述べる。図3-1に2003年におけるBNL加速器の全体図を、表3-1-1に各加速器の到達エネルギーを示す。

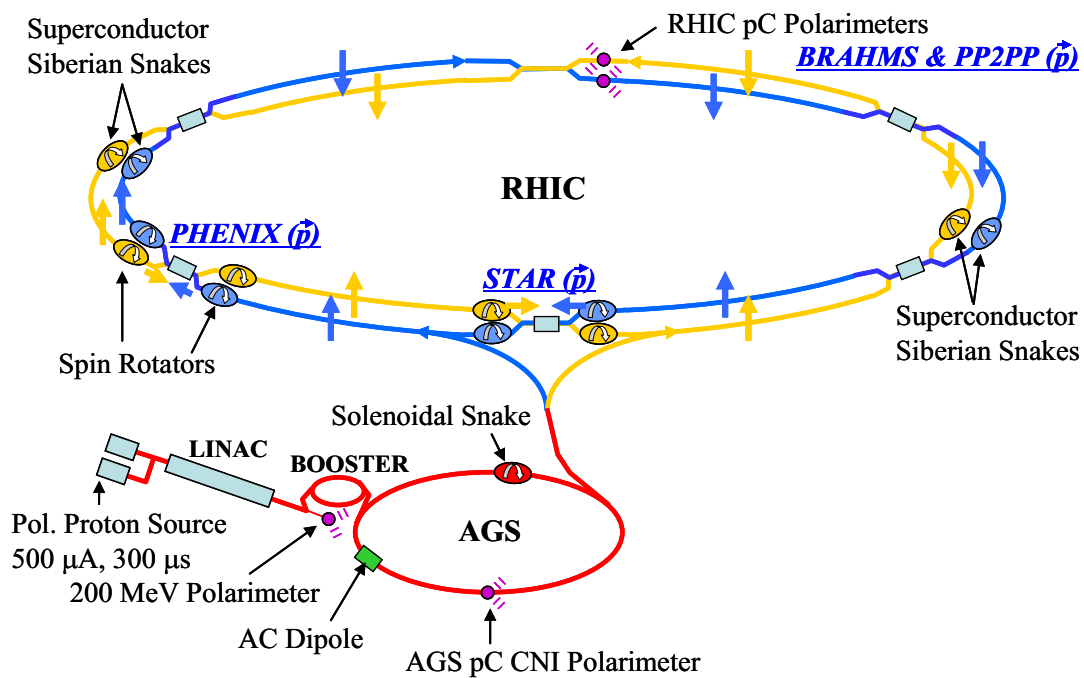


図 3-1 : 2003 年の BNL 加速器全体図

表 3-1-1 : 加速器到達エネルギー

	到達エネルギー
イオン源	20keV
線形加速器 (RFQ)	760keV
線形加速器 (DTL)	200MeV
Booster	1.5GeV
AGS	24.3GeV
RHIC	100GeV

### 3-1 偏極イオン源

現在BNLで用いられている偏極Hイオン源[3-1, 3-2]は1980年代に日本の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の Proton Synchrotron (PS 加速器) で偏極Dイオン源として用いられていたものである。KEKにおける偏極ビームの加速実験が終了した後、このイオン源はカナダの TRIUMF 研究所に輸送され、BNLに導入する前のアップグレードが行われ[3-3]、1999年にBNLの加速器に導入された。



図 3-1-1 : BNL の偏極 Hイオン源

図 3-1-2 にこの偏極イオン源の構造図を示す。また、3-1-3 から図 3-1-5 に各領域における過程を示す。

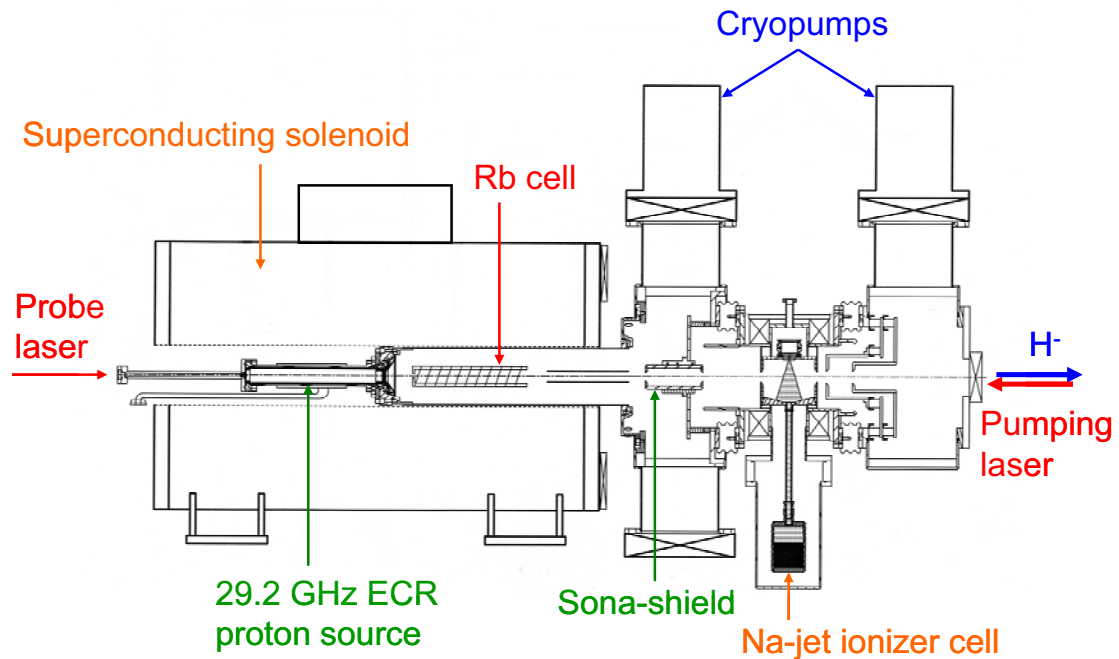


図 3-1-2 : 偏極イオン源の構造図

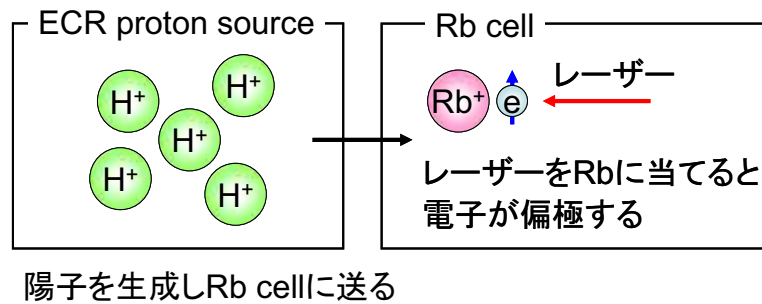


図 3-1-3 : ECR proton source と Rb cell における偏極イオンの生成過程

このように ECR proton source において陽子が生成され、20keV で引き出される。その後、陽子は Rb cell 領域を通過するが、この領域では Pumping laser によって Rb の周りを回っている電子のスピンの偏極化される。

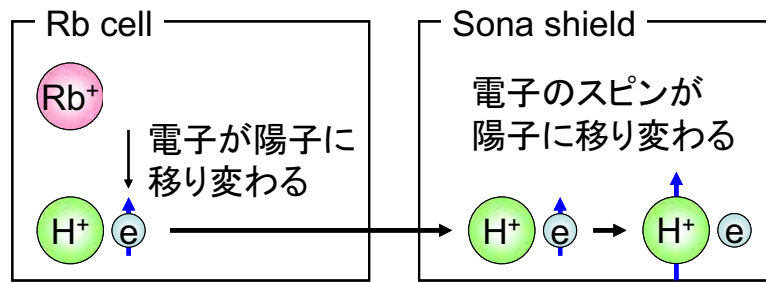


図 3-1-4 : Rb cell 領域から Sona shield 領域における偏極イオンの生成過程

この Rb の偏極した電子を陽子に捕獲させることで偏極した電子をもつ水素原子を生成する。その後、この水素原子は Sona shield 領域に送られ、この領域における定常磁場によって電子のスピンの陽子に乗り移る。

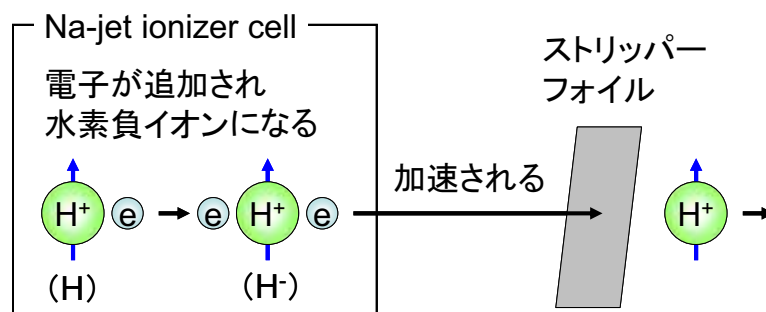


図 3-1-5 : Na-jet 領域からストリッパフォイルまでの偏極陽子を生成過程

Sona shield 領域の次に Na-jet ionizer cell 領域にて水素原子に電子を捕獲させ、偏極した  $H^-$  ビームを生成する。この時点では偏極の方向はビーム進行方向を向いている。本イオン源から出射されたビームは双極電磁石 2 台とソレノイドコイル 1 台を用いることで偏極の向きを垂直方向に向ける。[3-4] 以上のようにして偏極した  $H^-$  ビームは線形加速器に供給される。生成される偏極  $H^-$  ビームの偏極度は 75%~85% である。その後、偏極  $H^-$  ビームは Booster 加速器内の炭素薄膜でできたストリッパフォイルを通過し、電子が剥ぎ取られ、偏極陽子ビームとなる。[3-5]

### 3-2 線形加速器

偏極イオン源から 20keV で出力される偏極 H ビームは線形加速器に供給される。この線形加速器は Radio Frequency Quadrupole (RFQ) および Drift Tube Linac (DTL) で構成されている。偏極 H ビームは RFQ で 760keV まで加速され、DTL で 200MeV まで加速される。

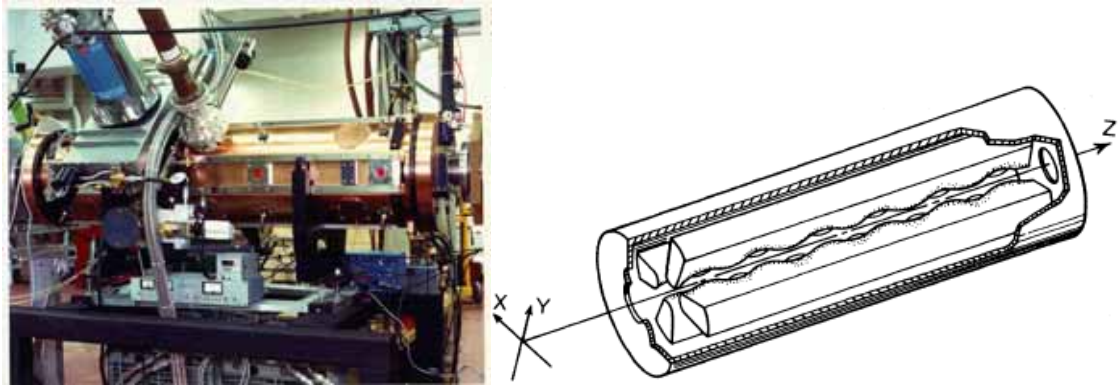


図 3-2-1 : BNL の RFQ 加速器 (左) と内部構造図 (右)

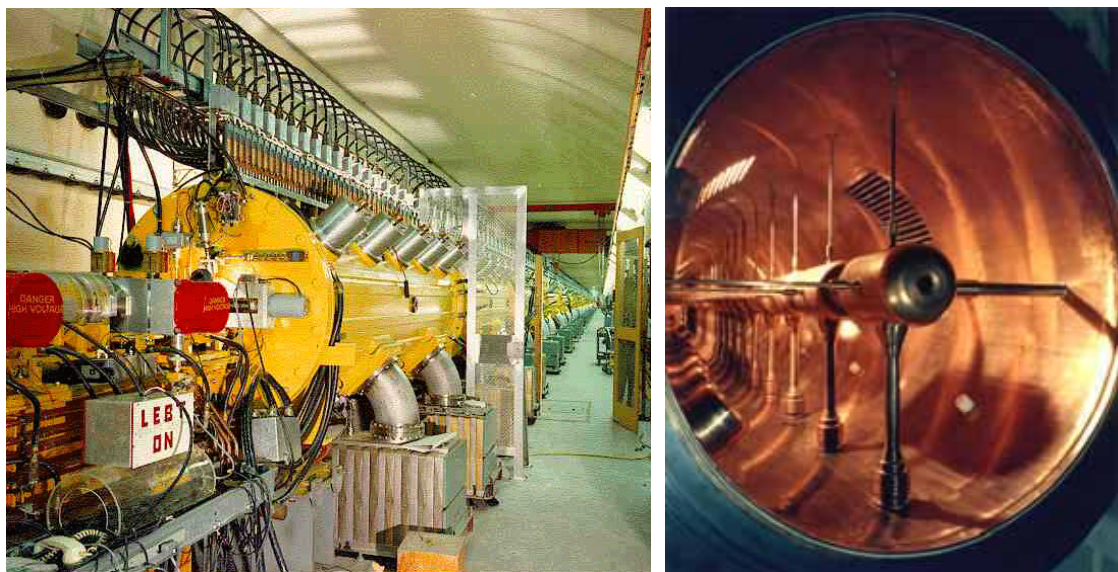


図 3-2-2 : DTL 加速器全景 (左) と DTL の内部 (右)

偏極 H ビームは線形加速器で加速された後、Booster 加速器に供給されるが、この線形加速器の直後には Booster 加速器にビームが供給される前の段階における偏極度を確認するため偏極度計が設置されている。図 3-2-3 は 200MeV 偏極度計[3-6, 3-7]の構造図である。

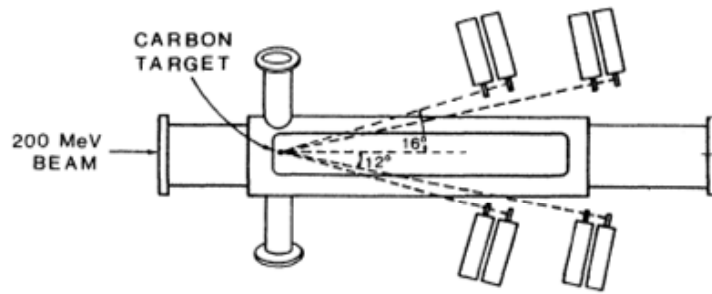


図 3-2-3 : 200MeV 偏極度計

偏極 H ビームは偏極度計内に垂直に置かれている炭素リボンに照射され、水平方向に散乱した炭素原子数の左右非対称性 (Raw asymmetry) が測定される。ビームの偏極度  $P$  は

$$P = \frac{1}{A} \left[ \frac{\sqrt{L_{\uparrow}R_{\downarrow}} - \sqrt{L_{\downarrow}R_{\uparrow}}}{\sqrt{L_{\uparrow}R_{\downarrow}} + \sqrt{L_{\downarrow}R_{\uparrow}}} \right] = \frac{\delta}{A} \quad (3-2-1)$$

と表される。ここで、 $A$  は Analyzing power であり、偏極度計固有の理論計算値である。 $\delta$  は検出器で測定した Raw asymmetry である。 $L_{\uparrow}$  ( $L_{\downarrow}$ ) および  $R_{\uparrow}$  ( $R_{\downarrow}$ ) は上向き (下向き) の偏極 H ビームによって左右に散乱した炭素原子数である。ここまででは偏極 H ビームに対する減偏極共鳴は無いため、観測される偏極度は約 80% である。

### 3-3 Booster 加速器

線形加速器から供給される偏極 H ビームは Booster 加速器に入った直後に炭素で作られたストリッパフォイルで電子を剥ぎ取られ、偏極陽子ビームに変換される。Booster 加速器の円周は 201.78m であり、後段にあたる AGS 加速器の約 1/4 の大きさである。Booster 加速器は 6 個の電磁石群で構成されており、各電磁石群は 4 個の FODO セルを持つ。水平ベータトロンチューン  $\nu_x$  は 4.82、垂直ベータトロンチューン  $\nu_y$  は 4.83 である。したがって、Booster 加速器における Vertical intrinsic resonance の条件式は

$$G\gamma = mP \pm \nu_y = 6m \pm 4.83 \quad (m \text{ は整数}) \quad (3-3-1)$$

となる。Booster 加速器のビーム加速レンジは 0.2GeV~1.56GeV であり、 $G\gamma$  のレンジは 2.2~4.7 であるため、Booster 加速器内では Vertical intrinsic resonance が存在しない。しかしながら  $G\gamma=2$  および 3 のとき、弱い Imperfection resonance が生じる。この減偏極

共鳴を避けるためビーム閉軌道のハーモニクスを調整する Harmonic correction 法が用いられる。このビーム閉軌道のハーモニクスは温度や潮汐力によって時々刻々変化するため、常に調整が必要となる。AGS 加速器や RHIC 加速器のようにエネルギーレンジが大きい場合、Imperfection resonance の数が多いため Siberian Snake 電磁石を用いて減偏極共鳴を乗り越えるが、Booster 加速器の場合 Imperfection resonance の数が 2 個だけであるため Harmonic correction 法でそれぞれの減偏極共鳴を避けている。

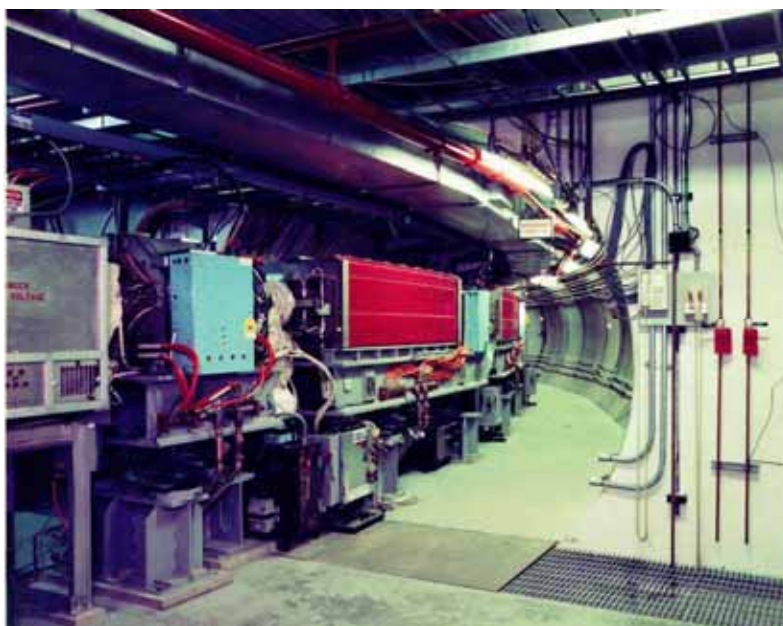


図 3-3-1 : Booster シンクロトロン加速器

Booster 加速器で加速された偏極陽子ビームは Booster-AGS 接続ビームライン (BtA) に出射され、AGS 加速器に供給される。

### 3-4 Warm Snake 導入前の AGS 加速器

AGS 加速器は図 3-4-1 に示されているように、A から L までの 12 個の電磁石群で構成されている。各電磁石群には加速器を構成している 20 個のメインダイポールが組み込まれている。FODO セル数は 1 電磁石群あたり 5 個である。偏極陽子ビームの加速および測定に必要な装置はメインダイポール同士の間の直線区間に導入されている。各直線区間の名称は直前のメインダイポールの位置名称で呼ばれている。例えば電磁石群 A

の 20 番目のメインダイポールの後で、電磁石群 B の 1 番目のメインダイポールの前の直線区間を A20 と呼ぶ。

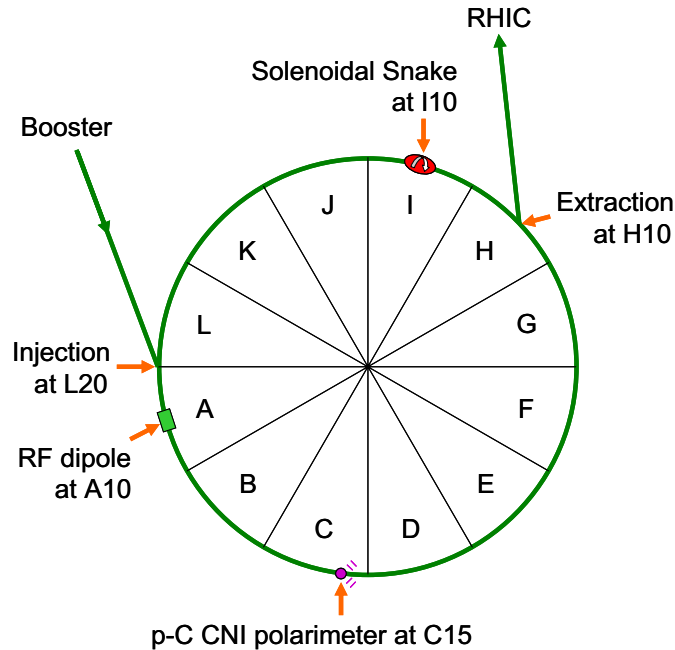


図 3-4-1 : Warm Snake 導入前の AGS 加速器の構成

AGS 加速器の円周は 807.09m、入射エネルギーは 1.56GeV、出射エネルギーは 24.3GeV であり、 $G\gamma$  のレンジは 4.5~46.5 である。水平方向のベータトロンチューン  $\nu_x$  は 8.85、垂直方向のベータトロンチューン  $\nu_y$  は 8.7 である。

ビーム加速のレンジと Imperfection resonance の条件式  $G\gamma = n$  ( $n$ は整数) より AGS 加速器における Imperfection resonance の数は 42 個である。当初 Booster 加速器と同様に Imperfection resonance を乗り越えるために Harmonic correction 法が用いられていたが、調整する必要がある共鳴点が多く、常に調整を求められる Harmonic correction 法ではすべての減偏極共鳴を避けることが困難であり、安定的に高い偏極度を維持することができない。この AGS 加速器の Imperfection resonance を安定的に乗り越えるために 1994 年に開発・導入された電磁石が Solenoidal Partial Siberian Snake (Solenoidal Snake, SSK) [3-8, 3-9]である。

AGS 加速器内の Vertical intrinsic resonance は電磁石群の数  $P$  が 12、垂直方向のベータトロンチューン  $\nu_y$  が 8.7 であることから

$$G\gamma = mP \pm \nu_y = 12m \pm 8.7 \quad (m \text{ は整数}) \quad (3-4-1)$$

となる。AGS 加速器のビーム加速レンジより Vertical intrinsic resonance は

$$\begin{aligned} G\gamma &= 0 + \nu_y, 24 - \nu_y, 12 + \nu_y, 36 - \nu_y, 24 + \nu_y, 48 - \nu_y, 36 + \nu_y \\ &= 8.7, 15.3, 20.7, 27.3, 32.7, 39.3, 44.7 \end{aligned} \quad (3-4-2)$$

で発生する。当初、この Vertical intrinsic resonance を乗り越える方法として、高速チューンジャンプ法[3-7]が用いられていた。これは垂直方向のベータトロンチューンが共鳴点と重ならないようにするため、急激にベータトロンチューンを変化させる方法である。しかしながら、この方法では AGS 加速器内のビームエミッタンスが増大してしまう問題があった。AGS 加速器は後段の RHIC 加速器に対する入射加速器の役割を持つため、ビームエミッタンスを可能な限り低くする必要がある。このエミッタンス増大の抑え、Vertical intrinsic resonance を乗り越えるために開発された装置が RF dipole 電磁石[3-10, 3-11, 3-12]である。この RF dipole は 1997 年に AGS 加速器に導入された。Solenoidal Snake と RF dipole について以下に順次詳しく説明する。



図 3-4-2 : AGS 加速器

### 3-4-1 Solenoidal Snake

図 3-4-3 に AGS 加速器内の Solenoidal Snake の写真を示す。この電磁石は常電導ソレノイドコイルを並べた構造になっており、ソレノイド磁場によるビームの水平-垂直方向の回転効果を利用して偏極の向きを変える Siberian Snake である。

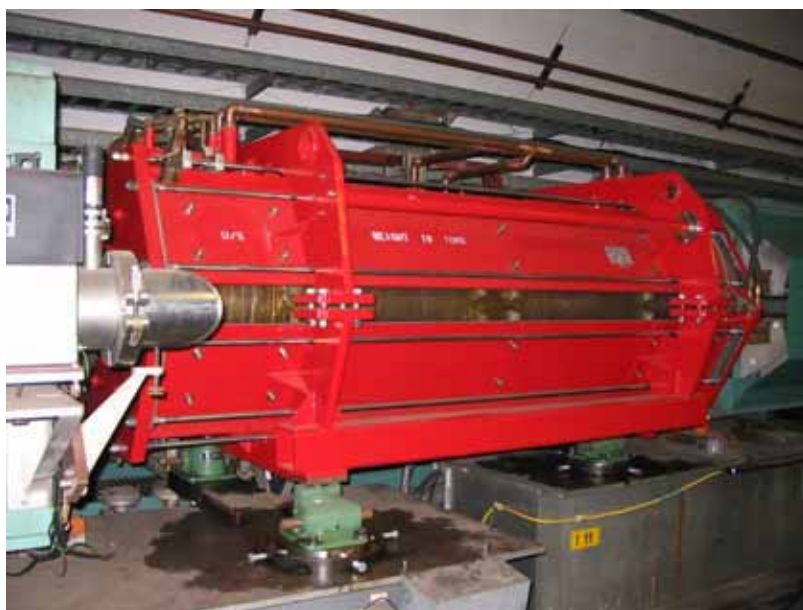


図 3-4-3 : Solenoidal Snake

表 3-1-2 : Solenoidal Snake のパラメータ

最大磁場	2T
磁場有効長	2.286m
コイル巻数	402turns
インダクタンス	6mH
抵抗	11.2mΩ
最大運転電流	9500A
定常運転電流	4000A
重量	10t

Solenoidal Snake が定常運転しているとき、Solenoidal Snake 内を偏極陽子ビームが通ると、偏極の向きは  $9^\circ$  だけ倒される。 $180^\circ$  を 100%としたとき  $9^\circ$  は 5%であることから、この AGS 加速器用の Solenoidal Snake は 5% Solenoidal Snake と呼ばれる。このように Solenoidal Snake を用いて偏極の向きを強制的に傾けることによって前章 2-2-4 で説

明した Imperfection resonance を避けることができる。

Solenoidal Snake は運転電流を調整することでスネーク強度（スネーク効果）を変えることができる。あるひとつの Imperfection resonance について Solenoidal Snake の強さを 0%～5%の範囲で変化させたところ、スネーク強度を 3%より強くしたとき偏極陽子ビームの偏極度が保持されることが確認された。より良く偏極度を保持するためには 5%程度のスネーク強さがあると良いため、Solenoidal Snake はスネーク強度が 5%となるように定常運転され、AGS 加速器内に存在する 42 個の Imperfection resonance を Harmonic correction 法を用いずに容易に乗り越えることが可能となった。

しかしながら、Solenoidal Snake によって生じるビーム進行方向の磁場と電磁石の出入口付近の漏洩磁場によって水平方向および垂直方向のベータトロン振動がカップリングしてしまうため、これまで垂直方向のベータトロンチューンのみが Intrinsic resonance の原因であったものが水平方向のベータトロンチューンも考慮する必要となる。このように Solenoidal Snake によるベータトロン振動のカップリングによって新たに生じる減偏極共鳴を Transverse coupling resonance[3-13, 3-14]と呼ぶ。この共鳴点の条件は

$$\begin{aligned} G\gamma &= mP \pm \nu_x = 12m \pm 8.85 \quad (m \text{ は整数}) \\ &= 0 + \nu_x, 24 - \nu_x, 12 + \nu_x, 36 - \nu_x, 24 + \nu_x, 48 - \nu_x, 36 + \nu_x \\ &= 8.85, 15.15, 20.85, 27.15, 32.85, 39.15, 44.85 \end{aligned} \quad (3-4-3)$$

となる。

この Transverse coupling resonance を減らし、なおかつ全ての Imperfection resonance を乗り越えるために考案された電磁石が本研究のメインテーマのひとつであるヘリカルダイポール構造をもつ Warm Snake[3-15, 3-16, 3-17, 3-18]である。これは長い双極電磁石を螺旋状にねじった形状となっており、ビーム進行方向と垂直な面の方向の磁場を発生するため、Solenoidal Snake によって引き起こされていた水平・垂直方向のベータトロン振動のカップリングを減らすことができる。したがって、Solenoidal Snake を Warm Snake に置き換えることで Transverse coupling resonance を減らすことができ、AGS 加速器の出口における偏極度を上げることが可能となる。この Warm Snake については次章以降にて詳しく説明する。

### 3-4-2 RF dipole と Vertical intrinsic resonance

AGS 加速器内の Vertical intrinsic resonance の強さを図 3-4-4 に示す。

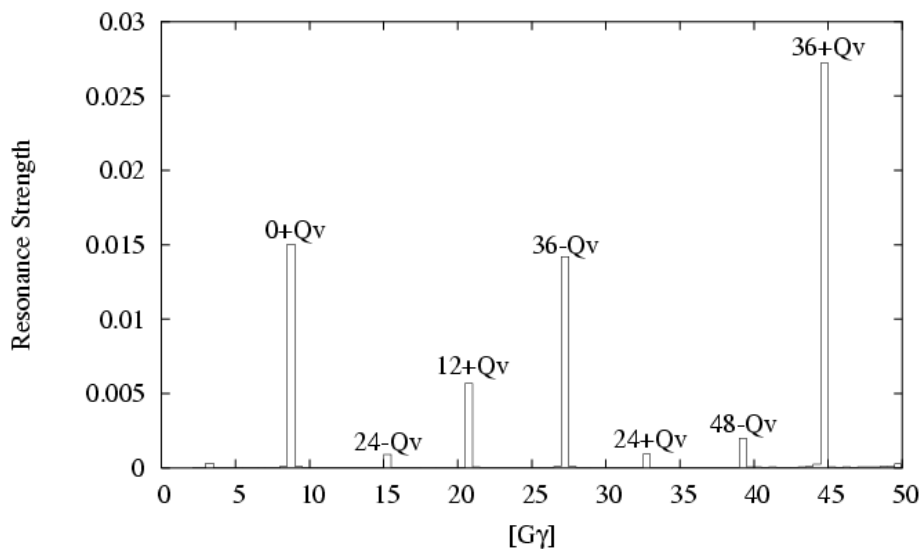


図 3-4-4 : AGS 加速器内における Vertical intrinsic resonance の強さ

これらの Vertical intrinsic resonance のうち  $G\gamma = 0 + \nu_y$ ,  $48 - \nu_y$ ,  $36 + \nu_y$  における減偏極効果をスピンの振る舞いを計算するプログラムソフトウェア DEPOL[3-19]を用いて計算した結果を図 3-4-5 から図 3-4-7 に示す。

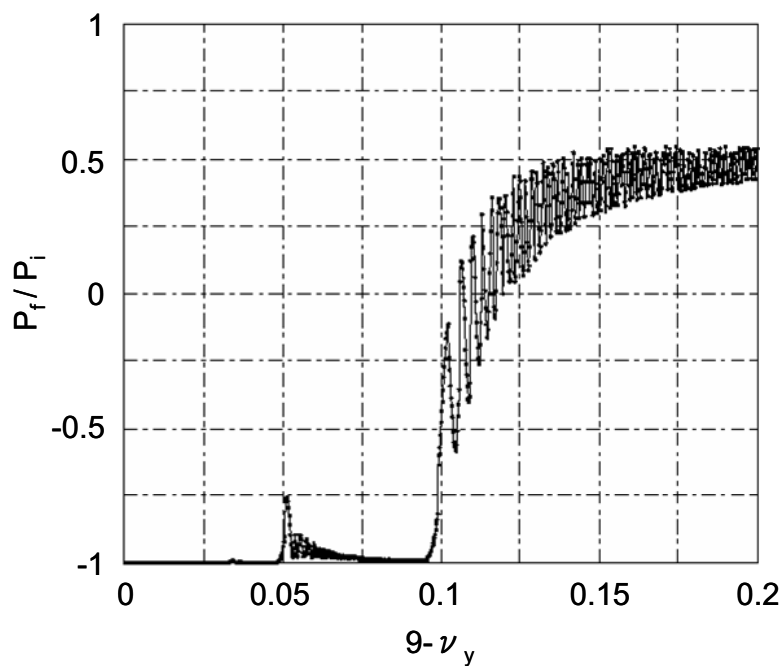


図 3-4-5 :  $G\gamma = 0 + \nu_y$  における減偏極効果

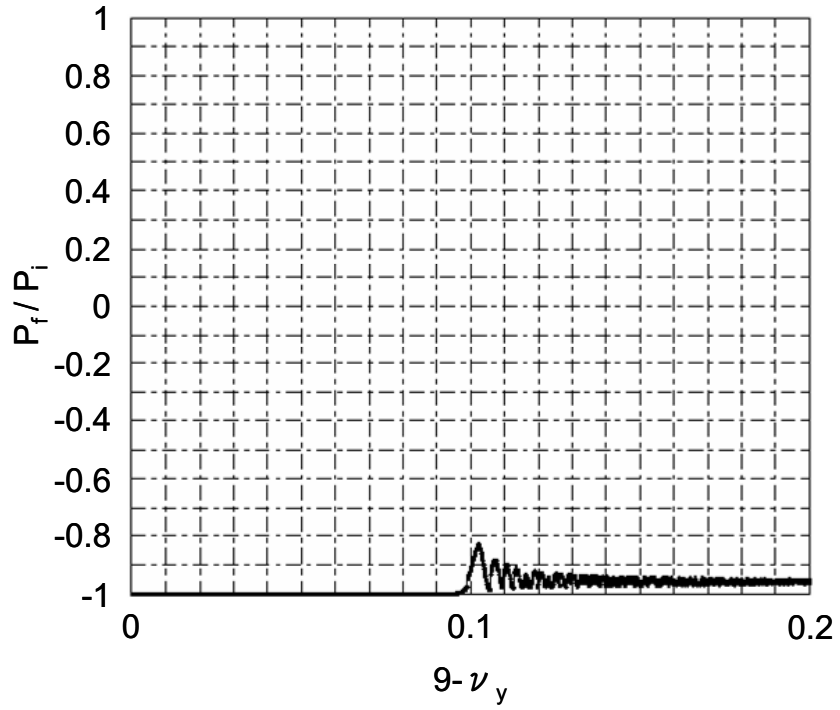


図 3-4-6 :  $G\gamma = 48 - \nu_y$  における減偏極効果

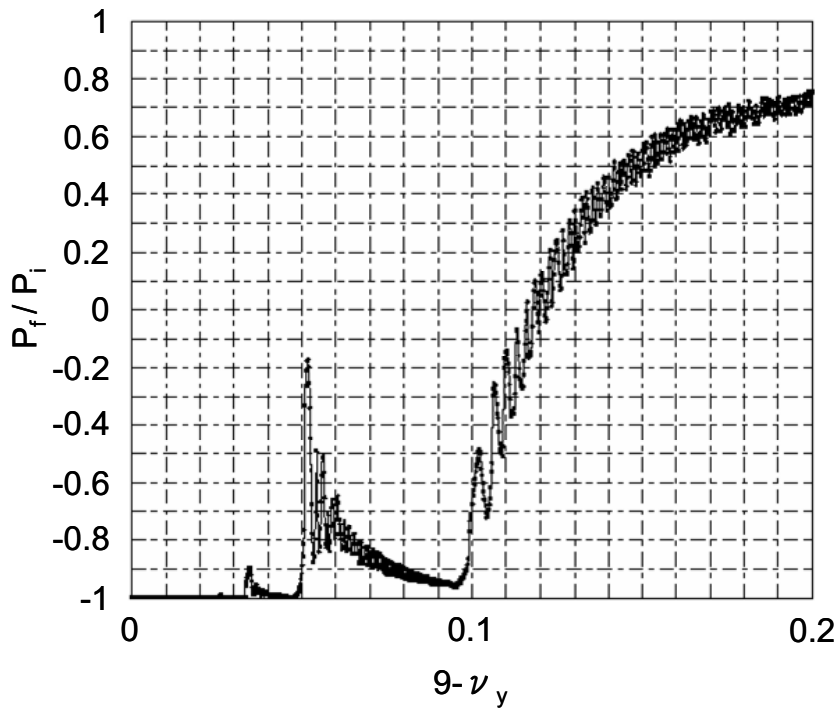


図 3-4-7 :  $G\gamma = 36 + \nu_y$  における減偏極効果

図 3-4-6 に示されているように  $G\gamma = 48 - \nu_y$  における Vertical intrinsic resonance による減偏極効果は小さい。したがって、 $G\gamma = 24 - \nu_y$  および  $G\gamma = 24 + \nu_y$  における減偏極も小さいものと考えられる。しかしながら、 $G\gamma = 0 + \nu_y$  および  $G\gamma = 36 + \nu_y$  における減偏極が著しい。 $G\gamma = 12 + \nu_y$  および  $G\gamma = 36 - \nu_y$  についても同様に減偏極効果が大きいものと考えられる。これらの強い減偏極共鳴を乗り越えるために RF dipole が開発された。RF dipole は図 3-4-8 に示されているような交流磁場を偏極陽子ビームに与えることで、図 3-4-9 に示されているように Vertical intrinsic resonance におけるスピンプリップを意図的に大きくすることで減偏極効果を減少させる役割をもつ電磁石である。RF dipole は AGS 加速器の A10 に設置されており、2004 年に Warm Snake を導入した後も Vertical intrinsic resonance を乗り越えるために使用されてきた。

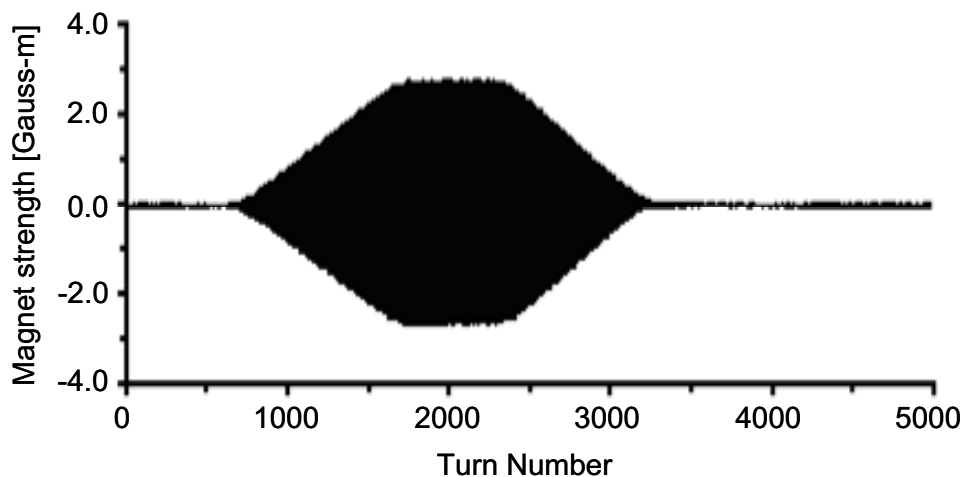


図 3-4-8 : RF dipole の磁場

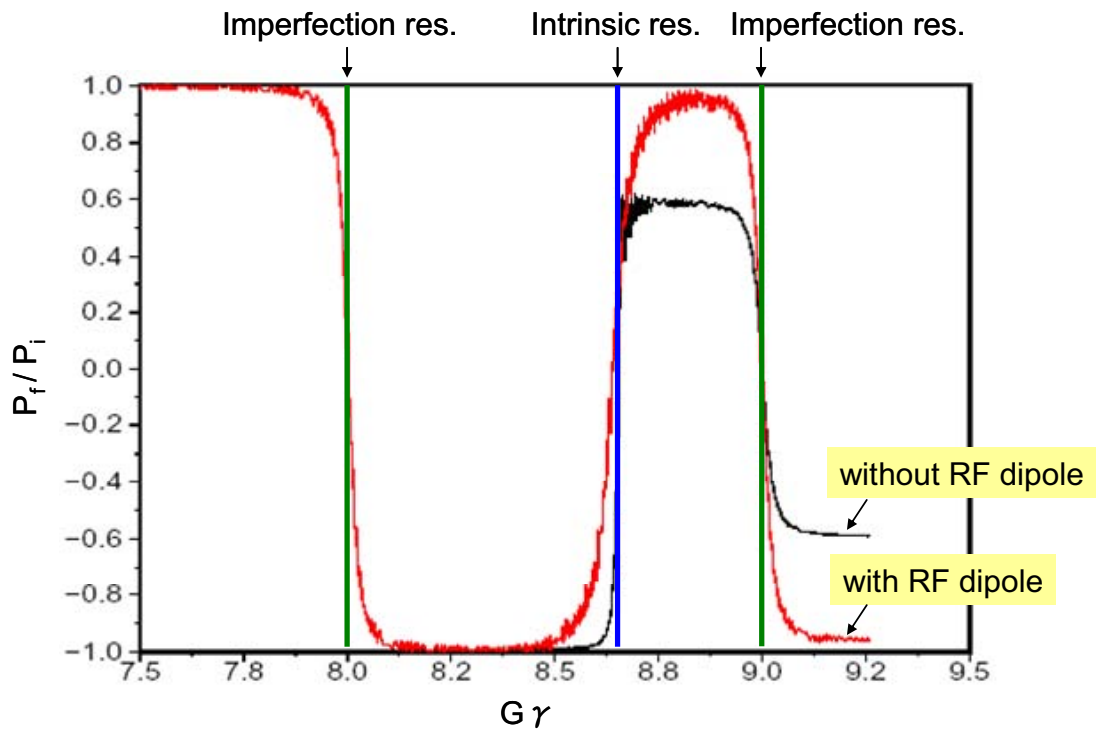


図 3-4-9 : RF dipole を用いた場合の共鳴点におけるスピンの振る舞い

このように RF dipole を用いることで Vertical intrinsic resonance におけるスピンのフリップが大きくなり、減偏極が少なくなっていることがわかる。Imperfection resonance においては Solenoidal Snake によって偏極度が維持されている。



図 3-4-10 : RF dipole

以上の RF dipole と Solenoidal Snake を組み合わせて運転することで Vertical intrinsic resonance および Imperfection resonance の両方の減偏極共鳴を避けることができ、2003 年の加速器実験ではビーム強度が  $1.0 \times 10^{11}$  protons/bunch のとき、AGS 加速器の出射エネルギーにおいて偏極度  $P=40\%$  を達成した。

### 3-4-3 AGS p-C CNI 偏極度計

AGS 加速器内における偏極度の測定はセクション C15 に設置されている proton-carbon Coulomb Nuclear Interference (p-C CNI) 偏極度計[3-20, 3-21, 3-22]を用いて行われる。

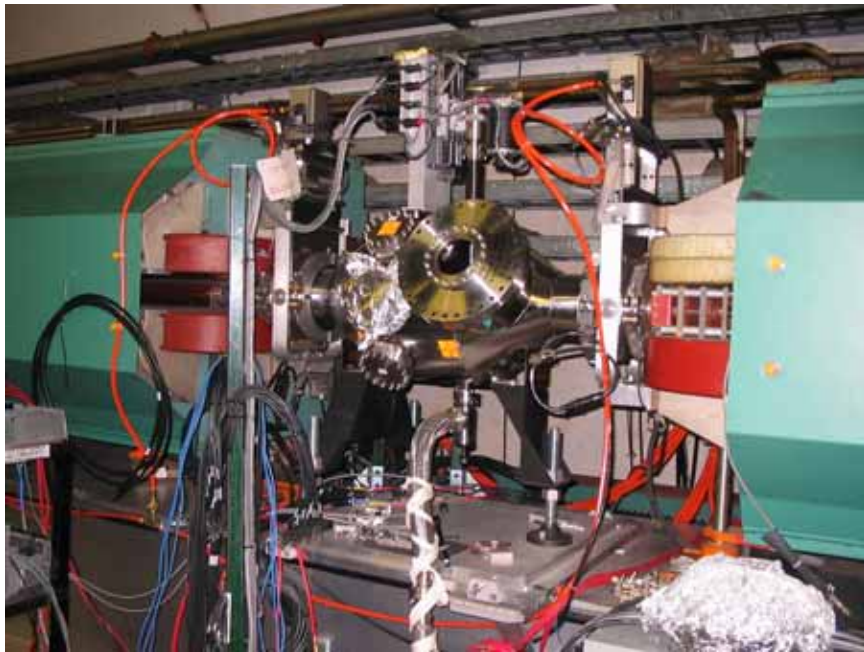


図 3-4-11 : AGS 加速器内の p-C CNI 偏極度計

本偏極度計は図 3-4-12 に示されているように超極細炭素ターゲットをビーム内に挿入し、散乱された炭素原子の数をシリコンディテクターで測定する構造になっている。

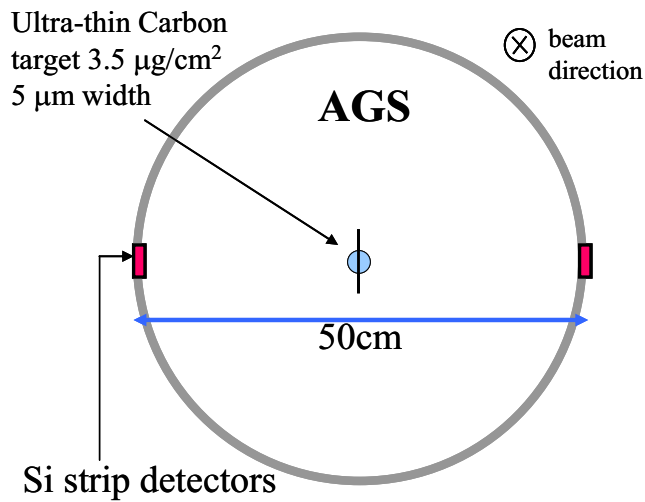


図 3-4-12 : AGS p-C CNI 偏極度計の構造

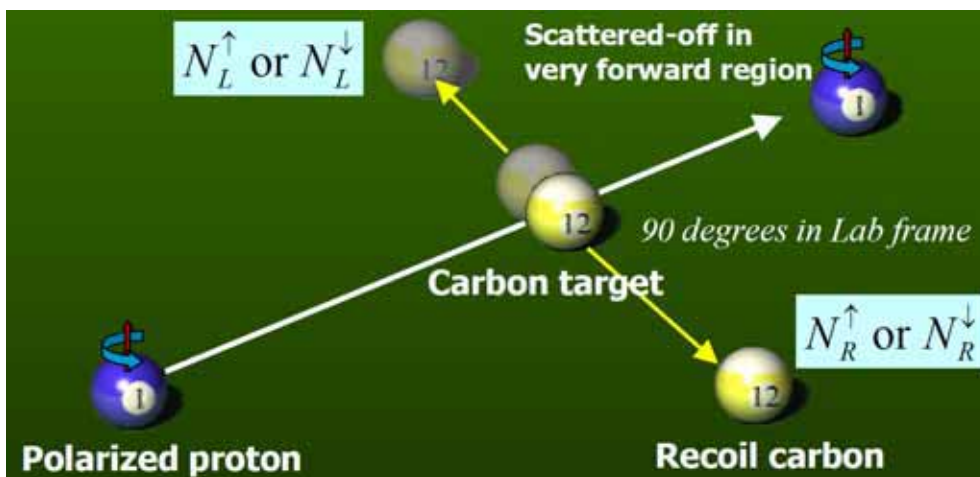


図 3-4-13 : 偏極陽子ビームと炭素原子の散乱のイメージ

この偏極度計では弾性散乱された炭素原子を約 20 秒間で 2000 万個測定し、その左右に散乱される炭素数の非対称性 (left-right asymmetry,  $\varepsilon$ ) を調べる。図 3-4-13 のように偏極陽子ビームが上向きまたは下向きのときに左右に散乱された炭素数を  $N_L$  および  $N_R$  としたとき、 $\varepsilon$  は式(3-4-4)のように定義される。

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{N_R^\uparrow N_L^\downarrow} - \sqrt{N_R^\downarrow N_L^\uparrow}}{\sqrt{N_R^\uparrow N_L^\downarrow} + \sqrt{N_R^\downarrow N_L^\uparrow}} \quad (3-4-4)$$

このようにして測定した asymmetry を偏極度に換算するためには理想的に偏極度が

100%の場合の非対称性を知っておく必要がある。この値は Analyzing power ( $A_N$ ) と呼ばれ、理論計算に過去の実験データの重みを加えることで得ることができる。

proton-carbon 散乱における Analyzing power の理論値のグラフを図 3-4-14 に示す。

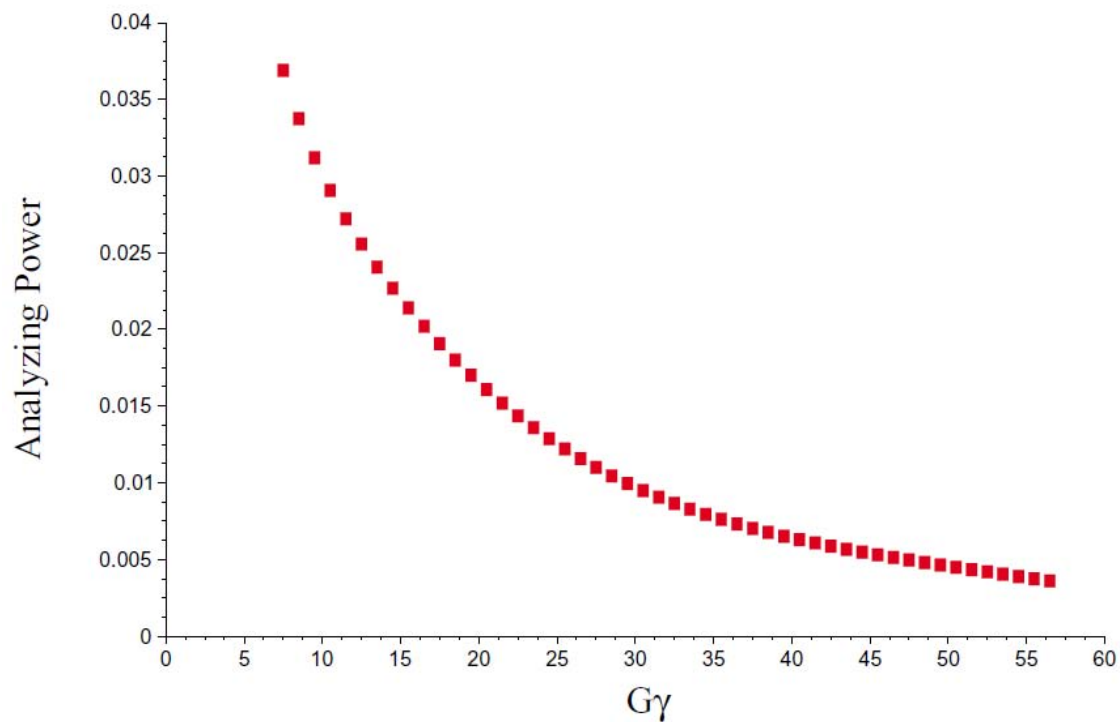


図 3-4-13 : proton-carbon 散乱の Analyzing power

これらの数値よりビームの偏極度 ( $P$ ) は

$$P = \frac{\varepsilon}{A_N} \tag{3-4-5}$$

として得られる。

### 3-5 RHIC 衝突型加速器

RHIC 加速器は図 3-5-1 に示されているように、2つのリング (Blue ring、Yellow ring) で構成されている。

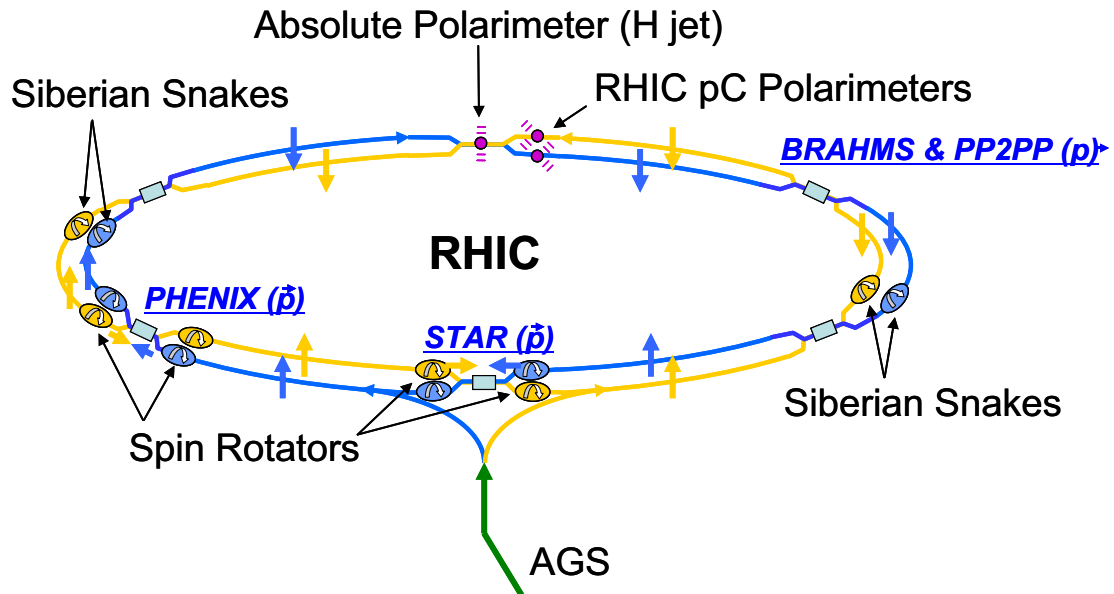


図 3-5-1 : RHIC 加速器の構成図

AGS 加速器から供給された偏極陽子ビームは図 3-5-2 (左) のスイッチングマグネットを用いて Blue ring と Yellow ring に振り分ける。



図 3-5-2 : ビーム振り分け用スイッチングマグネット (左) と RHIC 加速器 (右)

それぞれの加速器リングにてビームは時計回りおよび反時計回りに加速され、リングの 12 時、2 時、4 時、6 時、8 時、10 時にあるビームラインの交差点のうち 2 時、6 時、8 時の点でビーム同士が衝突する。偏極陽子ビームは 100GeV まで加速され、衝突エネルギー 200GeV における散乱実験が行われている。また、偏極陽子ビームを 250GeV（衝突エネルギーは 500GeV）まで加速する予定であり、現段階では 205GeV までの偏極陽子ビームの加速試験に成功している。[3-23]

### 3-5-1 RHIC Full Snake

RHIC 加速器においても AGS 加速器と同様に減偏極共鳴が存在する。図 3-5-3 に RHIC 加速器内における Vertical intrinsic resonance の強さの計算結果を示す。

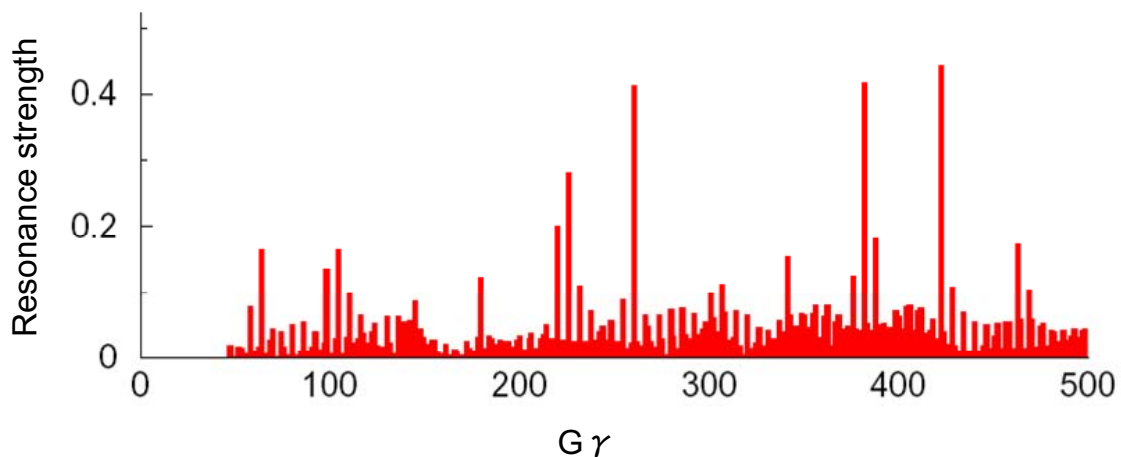


図 3-5-3 : RHIC 加速器内における Intrinsic resonance の強さ

これらの減偏極共鳴のため、偏極陽子ビームを 100GeV（将来的には 250GeV）まで加速することは非常に困難である。この問題を解決するため、RHIC 加速器内には Blue ring および Yellow ring それぞれに 2 台ずつ 180° 対称の位置に偏極の向きを 180° 変えることができる超伝導ヘリカルダイポール型 Full Siberian Snake[3-24, 3-25, 3-26, 3-27]が導入されている。このスネーク電磁石は全長 2.4m、最大磁場は 4T であり、RHIC 加速器内の全ての Vertical intrinsic resonance および Imperfection resonance を避けることができる。図 3-5-4 に RHIC Full Snake とその内部のヘリカルコイルの写真を、図 3-5-5 にスネーク電磁石内の偏極陽子ビームの軌道とスピンの向きの振舞い[3-25, 3-27]を示す。

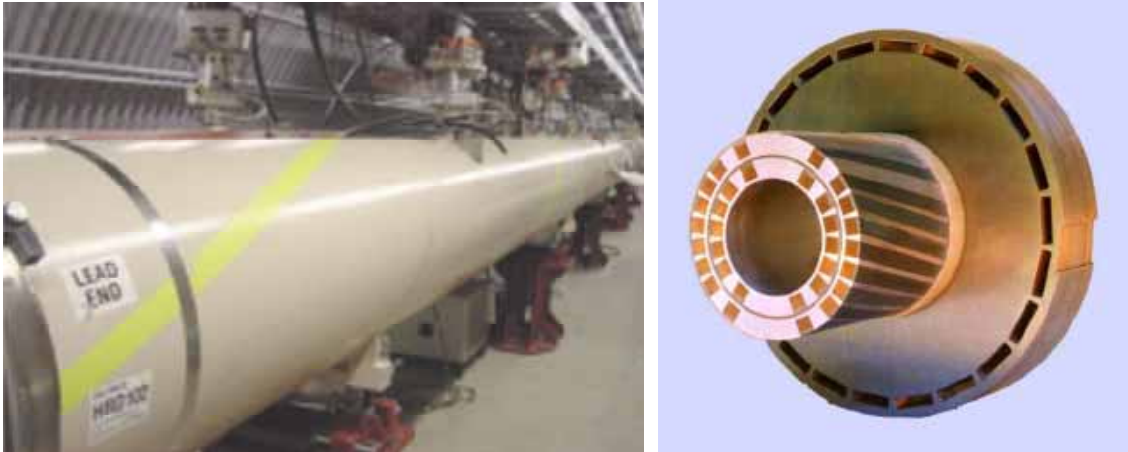


図 3-5-4 : RHIC Full Snake (左) とその内部のヘリカルコイル (右)

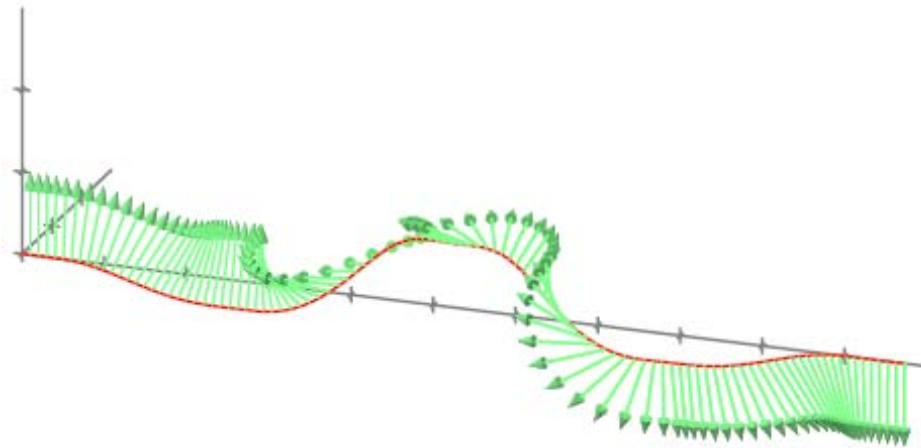


図 3-5-5 : RHIC Full Snake 内のビーム軌道とスピンの振る舞い

このように、RHIC Full Snake 内の偏極陽子ビームは螺旋軌道を描き、電磁石の入口と出口においてビーム進行方向と垂直な面上におけるビーム位置のオフセットが無く、ビームの出射角度のズレも持たない。したがって、加速器全体のビーム軌道に対する影響は最小限に抑えられている。また、この間にスピンはビームが磁場から受ける力の  $G$  倍 (陽子の場合  $G=1.7928$ ) の力を受け、図 3-5-5 のようにスピンの向きが上向きから下向きに変えられる。このようにして、意図的に偏極の向きを変えることで、加速器メインダイポールの磁場のエラーや四重極電磁石による収束効果による減偏極効果を避けることができる。

### 3-5-2 RHIC 加速器内の偏極度計

RHIC 加速器には Blue ring および Yellow ring に各 1 台ずつ proton-carbon CNI 偏極度計[3-28, 3-29, 3-30]が導入されている。この偏極度計の基本的な構造は AGS 加速器の p-C CNI 偏極度計と同じである。図 3-5-6 に RHIC p-C CNI 偏極度計の写真を示す。

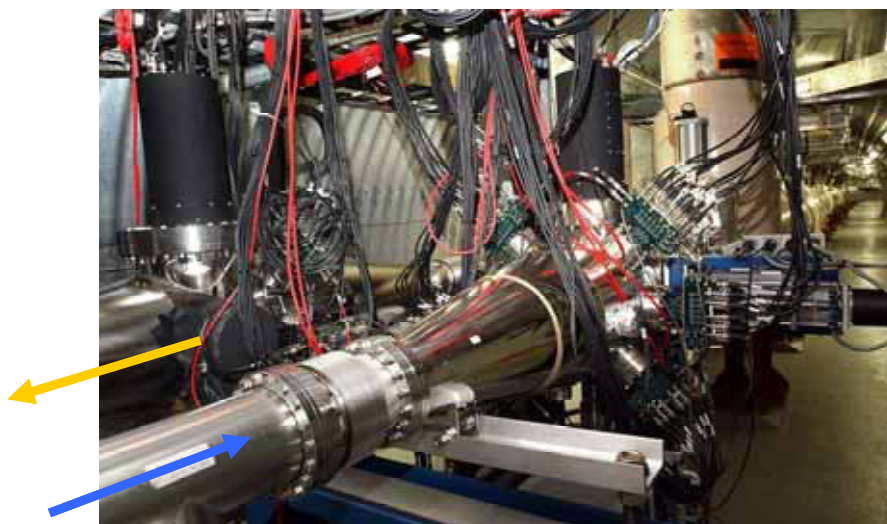


図 3-5-6 : RHIC p-C CNI 偏極度計

RHIC p-C CNI 偏極度計が AGS p-C CNI 偏極度計より優れている点はシリコンディテクターの数である。図 3-5-7 に RHIC p-C CNI 偏極度計の断面図を示す。

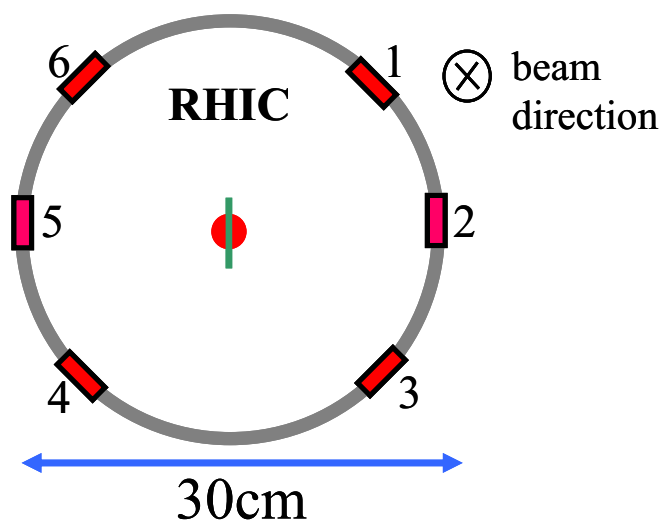


図 3-5-7 : RHIC p-C CNI 偏極度計の断面図

このように、シリコンディテクターが水平面および  $45^\circ$  の位置に合計 6 枚設置されている。図 3-5-7 中のディテクター番号 2 および 5 を用いてスピンの垂直成分 ( $S_y$ ) を測定し、 $45^\circ$  の位置に設置されているディテクターを用いることで  $S_x$  成分を測定することができる。

RHIC 加速器にはこの p-C CNI 偏極度計とは基本的構造の異なる水素ジェット偏極度計[3-31, 3-32, 3-33, 3-34]が 12 時のビームラインの交差点に設置されている。図 3-5-8 は水素ジェット偏極度計の写真である。

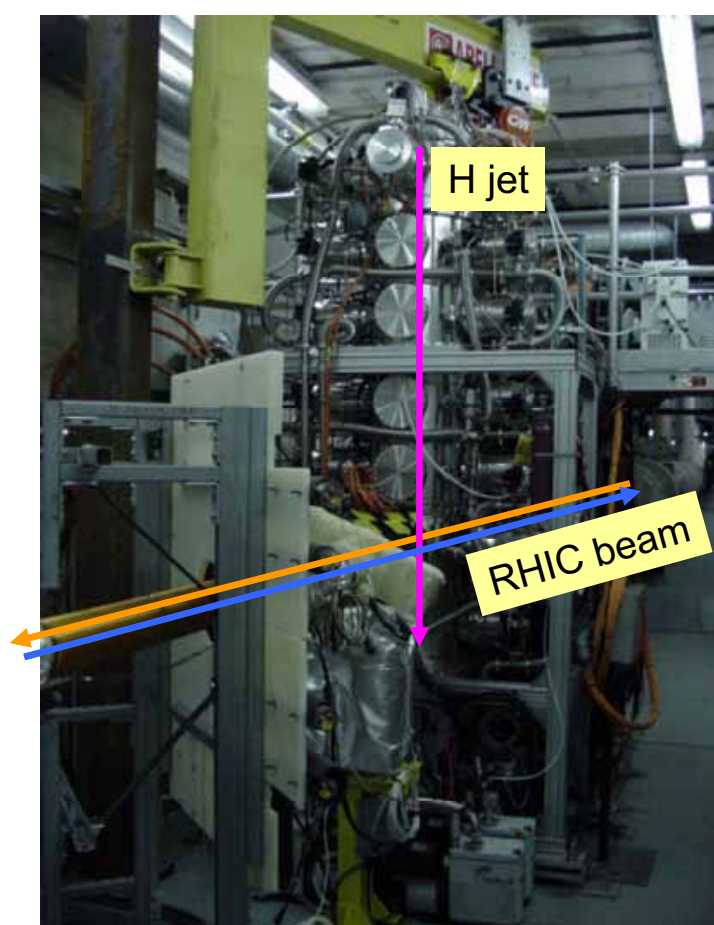


図 3-5-8 : 水素ジェット偏極度計

この水素ジェットターゲットは垂直方向に偏極している。偏極度は 96%であるが、測定結果にはこの水素ジェットターゲットの偏極度も考慮されている。p-C CNI 偏極度計とは異なり、ターゲットが水素ジェットであるため、絶対偏極度の測定が可能である。しかしながら、水素ジェット偏極度計では偏極陽子ビームとの散乱イベント数が少ないた

め、長期間測定する必要がある。したがって、RHIC 加速器の調整には数秒で偏極度の測定を行うことができる p-C CNI 偏極度計を用いるが、最終的にはこの p-C CNI 偏極度計による偏極度の測定結果は水素ジェット偏極度計の測定結果によって補正される。

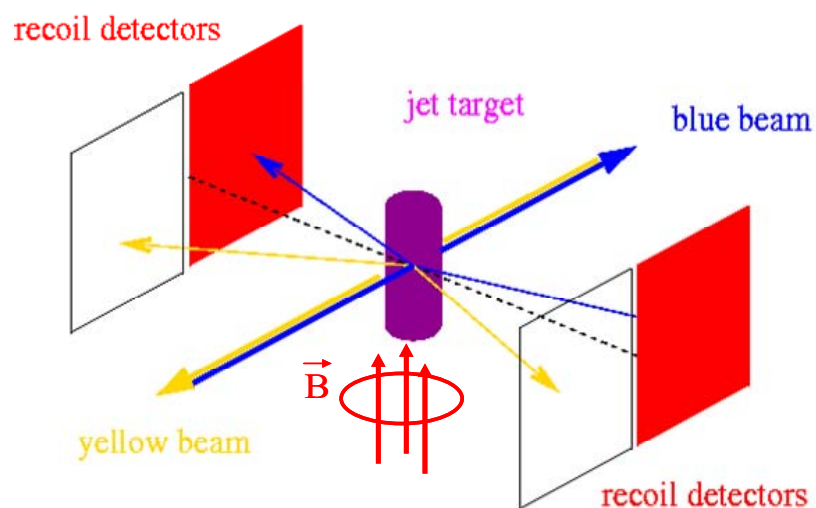


図 3-5-9 : RHIC ビームと水素ジェットの散乱と検出のイメージ

### 3-5-3 ビーム衝突実験の検出器と Spin rotator 電磁石

RHIC 加速器の 6 時の衝突点には STAR 検出器[3-35]、8 時の衝突点には PHENIX 検出器[3-36]が設置されている。偏極陽子ビームの衝突実験はこれらの検出器を用いて行われている。

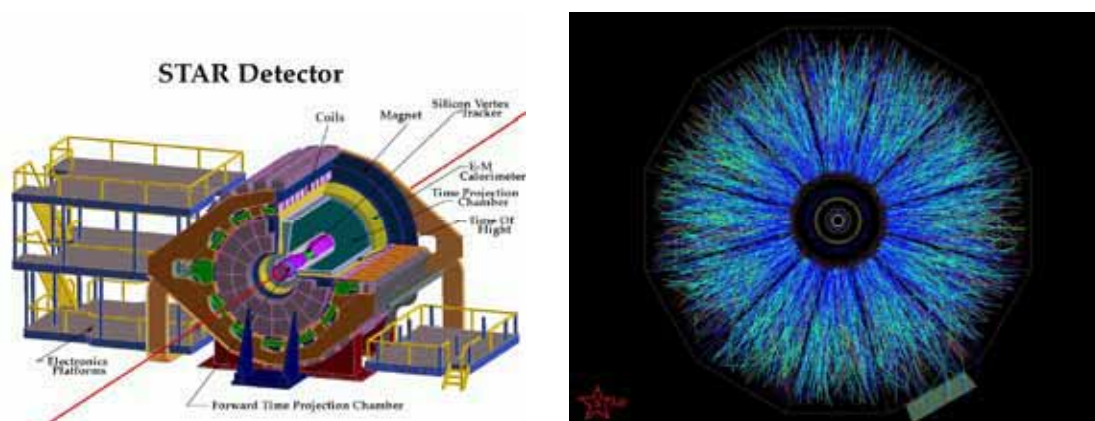


図 3-5-10 : STAR 検出器 (http://www.star.bnl.gov/より)

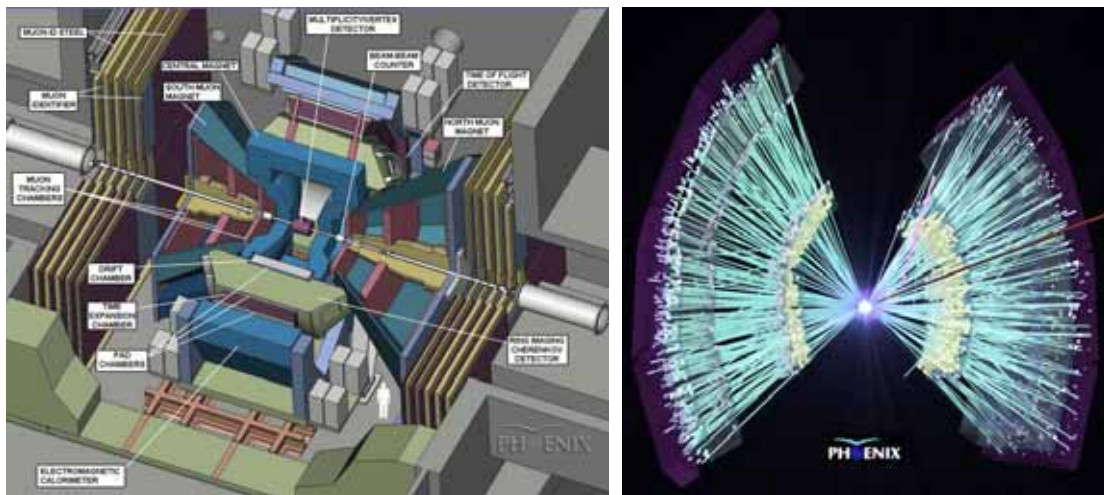


図 3-5-11 : PHENIX 検出器 (<http://www.phenix.bnl.gov/>より)

これらの検出器にて高エネルギーにおける偏極陽子ビーム同士の衝突による散乱粒子を計測し、陽子内のグルーオンスピンの陽子スピンの割合を調べる物理実験が行われている。これら PHENIX 検出器および STAR 検出器の直前には Siberian Snake と同様の技術で製作された Spin rotator[3-24, 3-25, 3-26, 3-27]が導入されている。これはそれぞれの衝突点における偏極の向きを Transverse 方向（横偏極）から Longitudinal 方向（縦偏極）に変えるために導入された。Spin rotator 内における偏極陽子ビームの振る舞いを図 3-5-12 に示す。

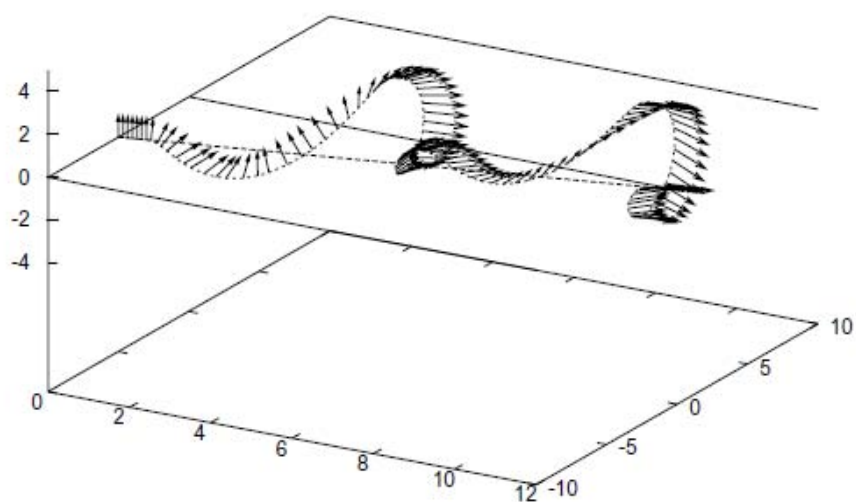


図 3-5-12 : Spin rotator 内の偏極陽子ビームの振る舞い

この Spin rotator を用いることで図 3-5-13 および図 3-5-14 のように横偏極した陽子ビーム同士  
の衝突および縦偏極した陽子ビーム同士の衝突が可能となった。

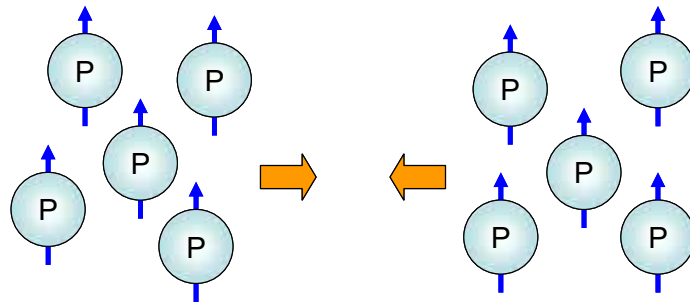


図 3-5-13 : 横偏極陽子ビーム同士の衝突

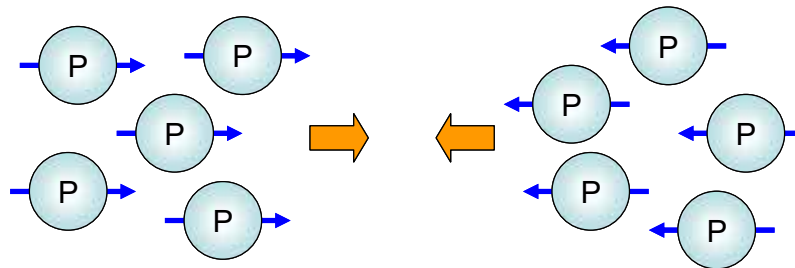


図 3-5-14 : 縦偏極陽子ビーム同士の衝突

## 参考文献

- [3-1] A. Zelenski, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **73**, 888 (2002)
- [3-2] A. Zelenski, *et al.*, “Optically-Pumped Polarized H<sup>-</sup> Ion Sources for RHIC and HERA Colliders”, Proc. 1999 Particle Accelerator Conference, New York, NY, 106-108 (1999)
- [3-3] A. Zelenski, *et al.*, “The TRIUMF High-Current DC Optically-Pumped Polarized H<sup>-</sup> Ion Source”, Proc. 1995 Particle Accelerator Conference, Dallas, TX, 864-866 (1995)
- [3-4] M. Okamura, *et al.*, “Design of a 35keV LEBT for the New High Intensity OPPIS at BNL”, Proc. 1999 Particle Accelerator Conference, New York, NY, 1964-1966 (1999)
- [3-5] Y. Y. Lee, *et al.*, “Injection and Accumulation Schemes for the AGS Booster”, Proc. 1987 Particle Accelerator Conference, 870-872 (1987)
- [3-6] D. G. Crabb, *et al.*, Report No. BNL 32780, (1983)
- [3-7] F. Z. Khiari, *et al.*, “Acceleration of polarized protons to 22GeV/c and the measurement of spin-spin effects in  $p \uparrow + p \uparrow \rightarrow p + p$ ”, Phys. Rev. **D39**, 45 (1989)
- [3-8] H. Huang, *et al.*, “Preservation of Proton Polarization by a Partial Siberian Snake”, Phys. Rev. Lett. **73**, 2982 (1994)
- [3-9] H. Huang, Ph. D. thesis, “Preservation of Polarization of Proton Beam in the AGS with a Partial Siberian Snake”, Indiana University (1995)
- [3-10] M. Bai, *et al.*, “Experimental test of coherent betatron resonance excitations”, Phys. Rev. **E56**, 5 (1997)
- [3-11] M. Bai, *et al.*, “Overcoming Intrinsic Spin Resonances with an rf Dipole”, Phys. Rev. Lett. **80**, 4673 (1998)
- [3-12] M. Bai, Ph. D. thesis, “Overcoming Intrinsic Spin Resonances by using an RF Dipole”, Univ. of Indiana (1999)
- [3-13] V. H. Ranjbar, *et al.*, “Spin coupling resonance and suppression in the AGS”, Phys. Rev. Special Topics – Accl. and Beams, **7**, 051001 (2004)
- [3-14] V. H. Ranjbar, Ph. D. thesis, “Increasing Proton Polarization in AGS and RHIC”, Univ. of Indiana (2002)
- [3-15] J. Takano, *et al.*, “Design Study of a Normal Conducting Helical Snake for AGS”,

- IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. **14**, No.2, 457-460 (2004)
- [3-16] J. Takano, *et al.*, “Field Measurements in the AGS Warm Snake”,  
Proc. 2004 European Particle Accelerator Conference,  
Lucerne, Switzerland, 2113-2115 (2004)
- [3-17] J. Takano, *et al.*, “Optimization of AGS Polarized Proton Operation with the Warm Helical Snake”,  
Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, 1003-1005 (2005)
- [3-18] J. Takano, *et al.*, “Helical Dipole Partial Siberian Snake for the AGS”,  
Journal of Instrumentation, **1**, P11002 (2006)
- [3-19] E. D. Courant and R. D. Ruth, “The Acceleration of Polarized Protons in Circular Accelerators”, BNL Report 51270 (1980)
- [3-20] J. Tojo, *et al.*, “Measurement of Analyzing Power for Proton-Carbon Elastic Scattering in the Coulomb-Nuclear Interference Region with a 22-GeV/c Polarized Proton Beam”,  
Phys. Rev. Lett. **89**, 052302 (2002)
- [3-21] J. Tojo, Ph. D. thesis, Kyoto University (2004)
- [3-22] J. Wood, Ph. D. thesis, “Polarimetry at the Brookhaven AGS Using Proton-Carbon Coulomb-Nuclear Interference”, Univ. of California Los Angeles (2005)
- [3-23] M. Bai, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 174801 (2006)
- [3-24] M. Harrison, S. Peggs, and T. Roser, “The RHIC Accelerator”  
Annual Rev. Nucl. Part. Sci. 2002. **52**: 425-69 (2002).
- [3-25] T. Roser, W. W. MacKay, *et al.*,  
Configuration Manual, “Polarized Proton Collider at RHIC”, (1998)
- [3-26] I. Alekssev, *et al.*, “Polarized Proton Collider at RHIC”,  
Nucl. Inst. and Meth. **A 499**, 392 (2003).
- [3-27] W. W. MacKay, *et al.*, “Superconducting Helical Snake Magnets: Construction and Measurements”, BNL AGS/RHIC Spin Note **80**. Presented at “Workshop on Polarized Protons at High Energies– Accelerator Challenges and Physics Opportunities”, May 17-20, 1999, DESY, Hamburg, Germany (1999) <http://www.desy.de/heraspin/>

- [3-28] O. Jinnouchi, *et al.*, BNL C-AD note C-A/AP/171 (2004)
- [3-29] O. Jinnouchi, Proc. of X<sup>th</sup> Workshop on High Energy Spin Physics Conf. (2003)
- [3-30] O. Jinnouchi, *et al.*, Proc. of 16<sup>th</sup> International Spin Physics Symposium SPIN2004, p.515 (2004)
- [3-31] A. Nass, *et al.*, Proc. of 16<sup>th</sup> International Spin Physics Symposium SPIN2004, (2004)
- [3-32] A. Zelenski, *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A536**, 248 (2005)
- [3-33] T. Wise, *et al.*, Nucl. Inst and Meth. **A559**, 1 (2006)
- [3-34] H. Okada, Ph. D thesis, “Measurement of the Analyzing Power  $A_N$  in  $pp$  Elastic Scattering in the CNI Region with a Polarized Atomic Hydrogen Gas Jet Target”, Kyoto University (2006)
- [3-35] STAR web page, <http://www.star.bnl.gov/>
- [3-36] PHENIX web page, <http://www.phenix.bnl.gov/>

## 第4章 常電導ヘリカルダイポール電磁石

### 目次

4-1	全体設計	p.50
4-1-1	設計条件	p.50
4-1-2	冷却方式	p.51
4-1-3	インダクタンス	p.54
4-1-4	構造設計	p.54
4-2	磁場計算	p.61
4-2-1	磁場計算コード	p.61
4-2-2	磁場特性曲線	p.62
4-2-3	二次元磁場計算	p.62
4-2-4	三次元磁場計算	p.64
4-3	電磁石の製作	p.70
4-3-1	1/5 スケールモデル	p.70
4-3-2	ヘリカルコイルの巻線	p.72
4-3-3	実機組み立て	p.77
4-3-4	検査および製作誤差	p.82
4-3-5	温度上昇測定	p.82
4-3-6	製作誤差を考慮した三次元磁場計算	p.83
	参考文献	p.88

## 第4章 常電導ヘリカルダイポール電磁石

本章では AGS 加速器に新たに導入した常電導ヘリカルダイポール電磁石 (Warm Snake) の全体設計、磁場計算[4-1]および電磁石の製作[4-2]について述べる。本電磁石を開発する目的は2つある。1つ目は AGS 加速器内の Imperfection resonance を乗り越えるため。2つ目はこれまで用いられてきた Solenoidal Snake[4-3, 4-4]によって生じていた Coupling resonance[4-5, 4-6]による減偏極効果を減らすためである。4-1 では Warm Snake の全体設計について述べる。はじめに、Warm Snake の機械的および電氣的スペックについて述べる。次に Warm Snake 用に新たに考案したヘリカルダイポール電磁石断面構造について述べる。4-2 では二次元および三次元の磁場計算を行い、ヘリカルダイポール内の螺旋磁場の最適化を行った。この最適な磁場は Warm Snake 内を通るビーム軌道が AGS 加速器全体のビーム軌道に対する影響を少なくするために考案されたダブルピッチ構造[4-7]を用いることで実現した。4-3 では Warm Snake の製作過程について述べる。ここでは 1/5 スケールモデルの製作、ヘリカルコイルの巻線、実機の製作、製作誤差の検証、温度上昇測定の考察、および製作誤差を考慮した三次元磁場計算と理想的な磁場の比較検討について詳細に述べる。

### 4-1 全体設計

加速器用電磁石を製作する際、サイズ、重量、電流、電圧、冷却水など施設による制限が生じる。はじめに、これらの制限を考慮した Warm Snake の仕様について述べる。その後、ヘリカルダイポール型電磁石特有の電磁石断面構造について述べる。

#### 4-1-1 設計条件

AGS 加速器には 12 個の電磁石群の間にそれぞれ直線スペースがある。図 4-1-1 に AGS 加速器内の直線スペースを示す。この直線スペースは長さが 2625mm であり、新たに AGS 加速器に導入する電磁石等の装置はこの長さ以内に抑える必要がある。また、ビーム軌道中心から加速器架台上面までの距離は 698.5mm であるため、電磁石の高さに対する制限も生じる。

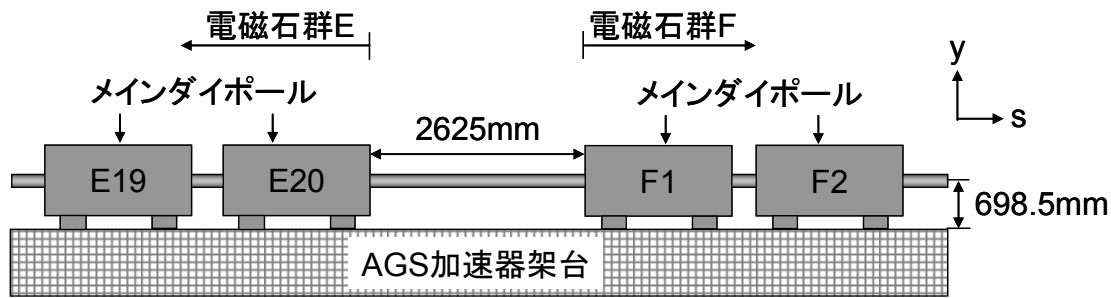


図 4-1-1 : AGS 加速器内の直線スペース

AGS 加速器内のクレーン設備は 18000kg までとなっているため、電磁石の重量に対しても制限がある。電源に関しては 3000A、300V のものを使用する。また、電流の最大ランプレートは 0.5 秒とする。冷却水については水圧が 15kg/cm<sup>2</sup> であり、この条件下で連続運転時の冷却水の温度上昇幅を 17°C 以下に抑えることが要求されていた。

Solenoidal Snake と同程度の偏極の向きを変えるスネーク効果を得るためには Warm Snake の磁極間隙中央における磁場強度は 1.5T 程度必要である。ここで起磁力  $M_p$  は

$$M_p = N[\text{turn}] \times I[A] = \frac{B[T] \times \text{Gap}[m]}{\mu_0} \quad (4-1-1)$$

と表されるため、磁場強度  $B$  を 1.5T、磁極間隙  $\text{Gap}$  を 150mm としたとき、起磁力  $M_p$  は 187000A・Turn となる。この起磁力に対し、電流を 3000A 以内に抑えるためには導線の巻数を 63 ターン以上にする必要がある。そこで、本電磁石用ヘリカルコイルの巻数は 10Turn×7Layer の合計 70 ターンとし、運転電流を 2670A とした。

#### 4-1-2 冷却方式

一般的に常電導コイルの冷却方式として自然空冷、強制空冷、間接水冷、直接水冷の四方式がある。自然空冷は比較的巻数が少なく総電流量も低い場合に用いられる。強制空冷は自然空冷だけでは冷却効果が不十分な場合に、ファンなどを用いてコイル表面の熱を逃がす方法である。間接水冷はコイルの間に冷却用の銅板を挟み、外側から銅板を冷却水で冷やす方式であり、比較的高い総電流量の場合に用いられる。直接水冷はホローコンダクター[4-8]と呼ばれるパイプのように冷却水用の水路を持つ導線を用いる方式である。この方式は導線の全長が長く、総電流量が高い場合、すなわち抵抗による発

熱が高い場合に用いられる。Warm Snake 用ヘリカルコイルは導線の全長が長く、総電流量が高いため、直接水冷方式を採用した。ここで、ホローコンダクターの断面図を図 4-1-2 に示す。

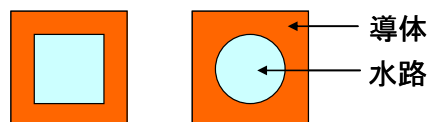


図 4-1-2 : ホローコンダクターの断面図 (左 : Type A 右 : Type B)

このようにホローコンダクターには 2 種類の水路がある。それぞれ水路断面積や導体断面積についていくつかの規格サイズがある。表 4-1-1 にホローコンダクターの規格とヘリカルコイルの抵抗値  $R$ 、電圧  $Voltage$ 、総電力  $Power$ 、流量  $Q_t$ 、温度上昇幅  $\Delta t$  を示す。

表 4-1-1 : ホローコンダクターの規格と温度上昇幅

Conductor type	A	A	A	A	B	B	B
Outer size [mm]	16	14.5	14	13	16	11	9
Inner size [mm]	12	10	10	10	10	6	6
S [mm <sup>2</sup> ]	108.8	109	93.1	61.8	176.6	91.8	52.5
R [mΩ]	86.6	86.5	101.2	152.5	53.4	102.7	179.5
Voltage [V]	231.3	230.9	270.3	407.2	142.5	274.1	479.4
Power [kW]	617.6	616.5	721.7	1087.3	380.5	732.0	1279.9
Qt single [lit/min]	324.6	205.8	205.8	205.8	112.5	31.4	31.4
$\Delta t$ single [°C]	27.5	43.3	50.6	76.3	48.8	336.9	589.2
Qt parallel [lit/min]	918.1	582.0	582.0	582.0	318.2	88.7	88.7
$\Delta t$ parallel [°C]	9.7	15.3	17.9	26.9	17.2	118.8	207.7

ここで流量  $Q_t$  は

$$Q_t = T_c \times 27.2 \times d^2 \times \sqrt{\frac{d \times P_w}{0.016 \times L_w}} \quad (4-1-2)$$

と表される。 $T_c$  はコイルのターン数、 $d$  は水路の内径、 $P_w$  は水圧、 $L_w$  は 1 水路あたりのコイルの長さである。1 周あたりのコイルの平均長  $L_{ave}$  はヘリカルコイルのビーム進行方向の長さとビーム進行方向と垂直な平面上の位置から 7.83m となる。1 水路あたり

7Layer であるため  $L_w$  は 54.8m となる。またコイルをすべて直列につないだとき総巻数が 70Turn であることからヘリカルコイルの導線全長  $L$  は 548m となる。温度上昇  $\Delta t$  は冷却水の流量  $Q_t$  と必要電力  $P$  より

$$\Delta t = 14.4 \times \frac{P}{Q_t} \quad (4-1-3)$$

と求めることができる。

鉄芯内の磁場飽和と電磁石のサイズおよび重量を考慮すると、コイル断面のサイズを小さくするため、可能な限り細い導線を用いるほうが良い。しかしながら、表 4-1-1 のように細い導線ほど導体面積が小さいため抵抗値が高くなり、冷却水の流量も少なくなるため温度上昇幅が大きくなってしまふ。表内の黄色の部分には制限値を超えている値である。 $Q_{t \text{ single}}$  と  $\Delta t \text{ single}$  は通常の巻線を行った場合、すなわち 1 コイルあたり 1 水路となる巻線を行った場合の流量と温度上昇幅である。この巻線方法のとき表 4-1-1 の全てのホローコンダクターは温度上昇幅の制限値である  $17^\circ\text{C}$  を超えてしまふ。そこで、新たに水路数を二倍に増やすパラレルワインディング法を考案した。これは図 4-1-3 のように 2 本のホローコンダクターを同時に巻くことで 1 コイルあたり 2 水路を実現し、なおかつ 1 水路あたりの長さを半分にするので流量を増やすことができ、温度上昇幅を格段に下げることが可能となった。

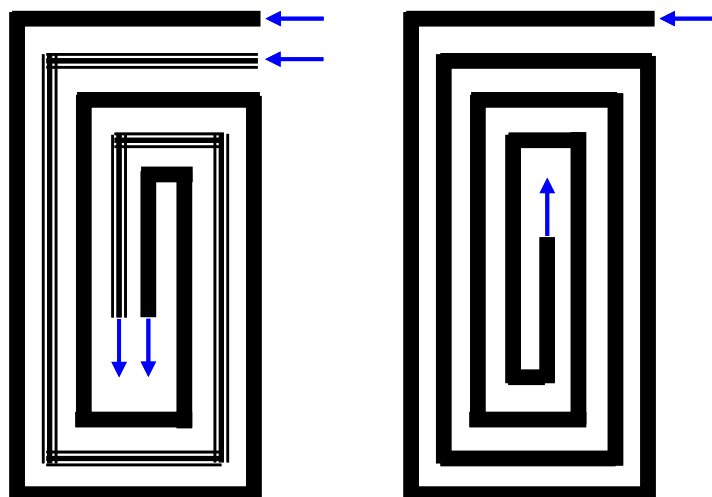


図 4-1-3 : パラレルワインディング法 (左) とシングルワインディング法 (右)

この平行ワイディング法を用いた場合の流量と温度上昇幅は表 4-1-1 において  $Q_{t\text{ parallel}}$  および  $\Delta t_{\text{ parallel}}$  と表記されている。以上より、電圧および温度上昇幅で制限値内にあるホローコンダクターは Type A の Outer size が 16mm と 14.5mm のものであることがわかる。このうち、より細い導線として Outer size が 14.5mm のものを Warm Snake のヘリカルコイル用の導線として採用した。

### 4-1-3 インダクタンス

ヘリカルコイルに蓄えられる磁界のエネルギー  $U_M$  は三次元磁場計算ソフトウェアを用いて求めた。その結果  $U_M = 125\text{kJ}$  であったため、ヘリカルコイルのインダクタンスは

$$L = \frac{2U_M}{I^2} = 35\text{mH} \quad (4-1-4)$$

となる。ここで、電流を最大ランプレートの 0.5 秒で 0A から 2670A まで上げた場合、インダクタンスによる電圧は

$$V_i = L \frac{dI}{dt} = 187\text{V} \quad (4-1-5)$$

となる。抵抗による電圧とインダクタンスによる電圧より合計電圧は 418V となってしまい、電源による制限である 300V を越えてしまう。しかしながら、Warm Snake は AGS 加速器のメインダイポールとは異なり、ビームの入射エネルギーから出射エネルギーまで一定の電流で運転する設計になっている。したがって、Warm Snake は上記の例のように急激に電流を変化させる必要はない。インダクタンスを考慮した電圧を 300V 以内にするために加速器を稼動する前に 1.35 秒より遅いランプレートで運転電流まで上げることによって電源の電圧制限内で Warm Snake を稼動することができる。

### 4-1-4 構造設計

ここではヘリカルダイポール電磁石の断面形状について考察する。図 4-1-4 および図 4-1-5 は H 型電磁石用コイルおよび WF 型電磁石用コイルを元にコイルを螺旋状にした場合のコイルの断面形状の変形を示すものである。

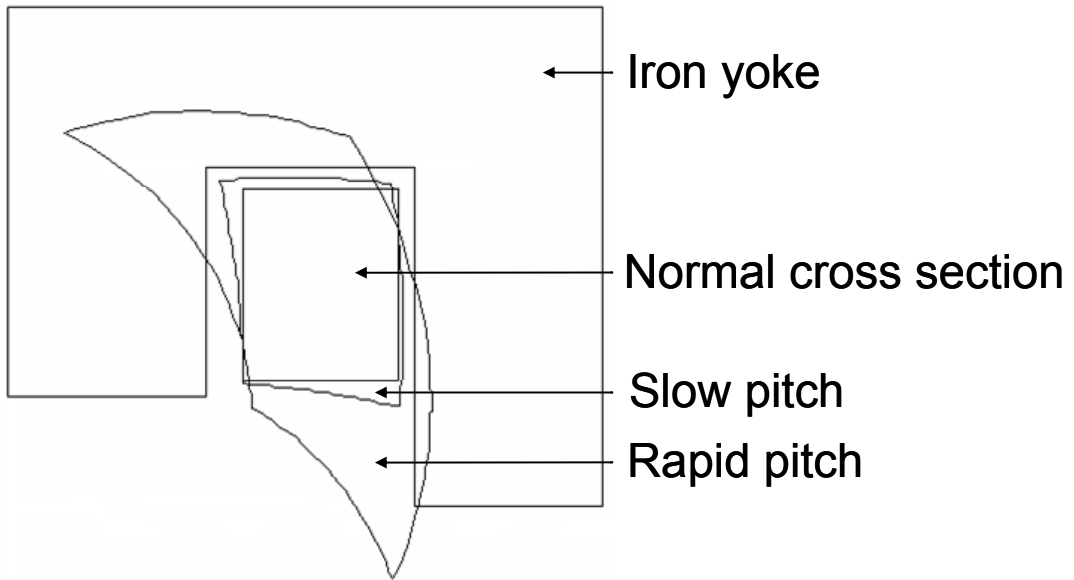


図 4-1-4 : H 型コイルを元にしたヘリカルコイルの断面形状の変形

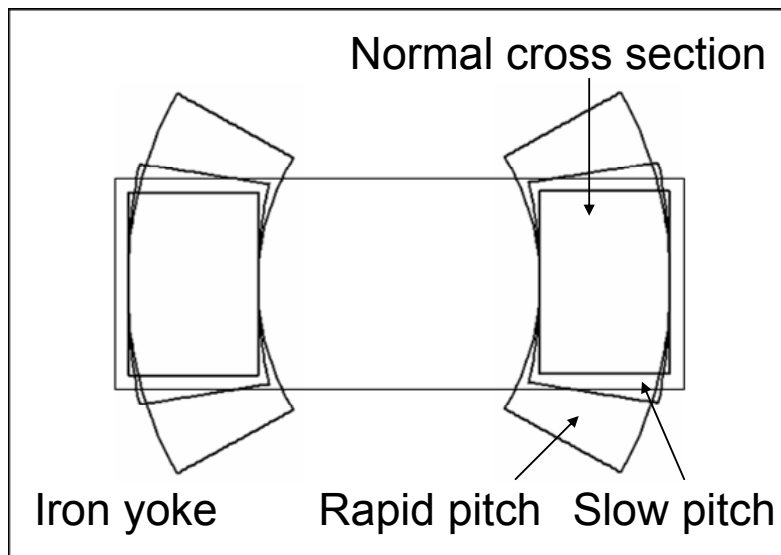


図 4-1-5 : WF 型コイルを元にしたヘリカルコイルの断面形状の変形

図 4-1-4 に示されているように、H 型電磁石用コイルの場合、ヘリカルピッチが急になるほどコイル断面形状の変形が著しくなる。特に Rapid pitch の場合、鉄芯内の磁気回路を分断してしまうほどの変形となる。

図 4-1-5 に示されているように、WF 型電磁石用コイルの変形においてもヘリカルピッチが急なほど変形が著しい。しかしながら、H 型の場合に比べて変形が少なく、鉄芯の形状を工夫することでヘリカルダイポール型電磁石を実現することが可能である。したがって、WF 型電磁石用コイルを元に Warm Snake 用ヘリカルコイルを設計した。図 4-1-6 にヘリカルコイルの三次元磁場計算用モデルを示す。図 4-1-6 のようにヘリカルコイルは 2 つの異なるヘリカルピッチを持つダブルピッチ構造である。これについては次節の三次元磁場計算で詳しく説明する。ヘリカルコイル両端の折り返し部分は WF 型コイルのようにビームをふさぐことなく、最短経路で折り返すことが可能である。

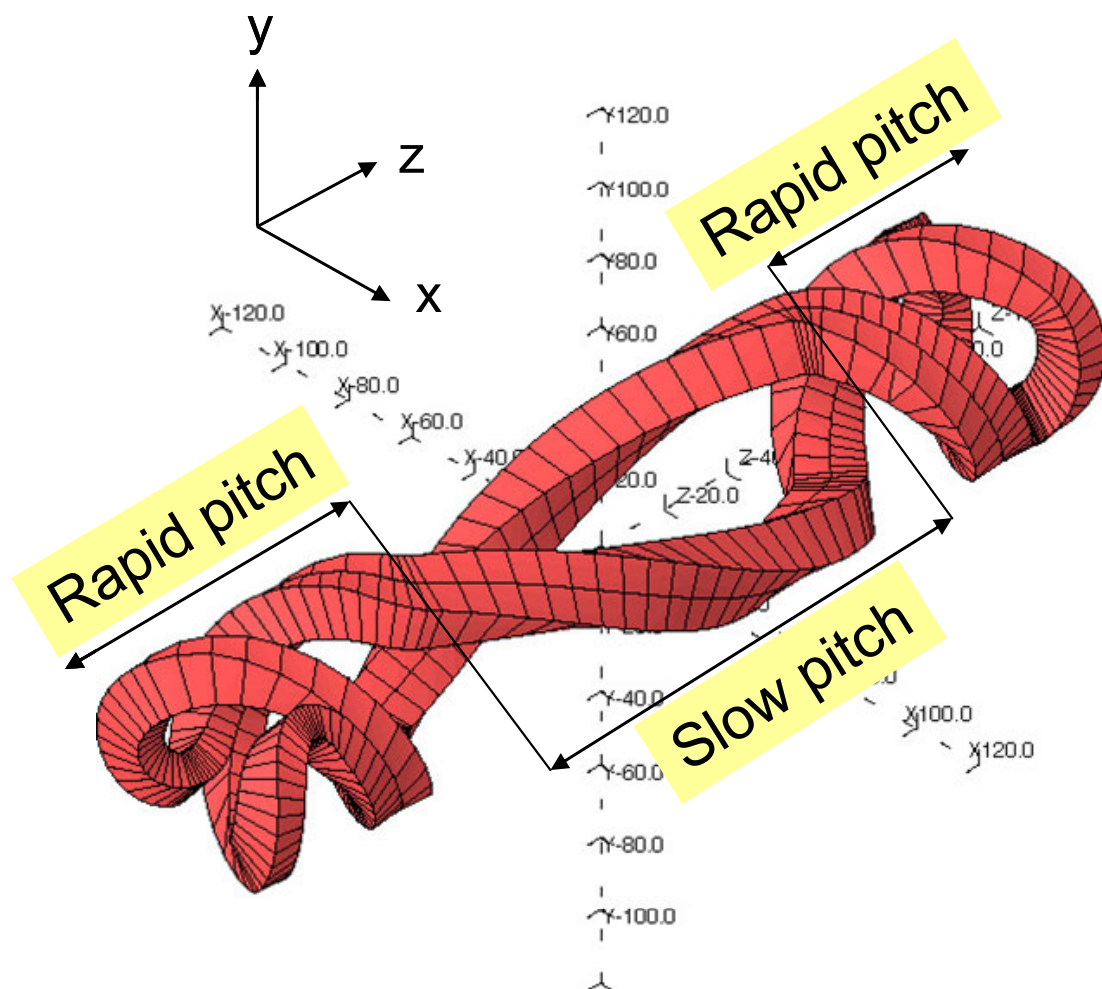


図 4-1-6 : Warm Snake 用ヘリカルコイルの三次元モデル

ヘリカルコイルの 2 つのピッチとその長さの最適化については次節の三次元磁場計算で述べる。このヘリカルピッチによるコイル断面の変形を考慮した鉄芯の断面形状を図 4-1-7 および図 4-1-8 に示す。

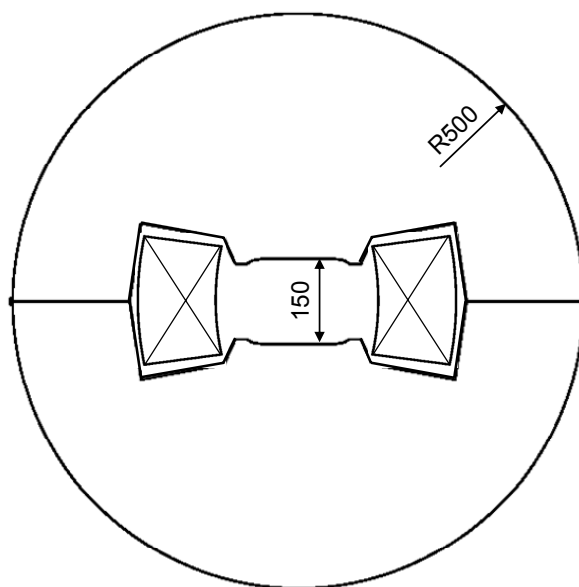


図 4-1-7 : Slow pitch におけるヘリカルコイルと鉄芯の断面形状

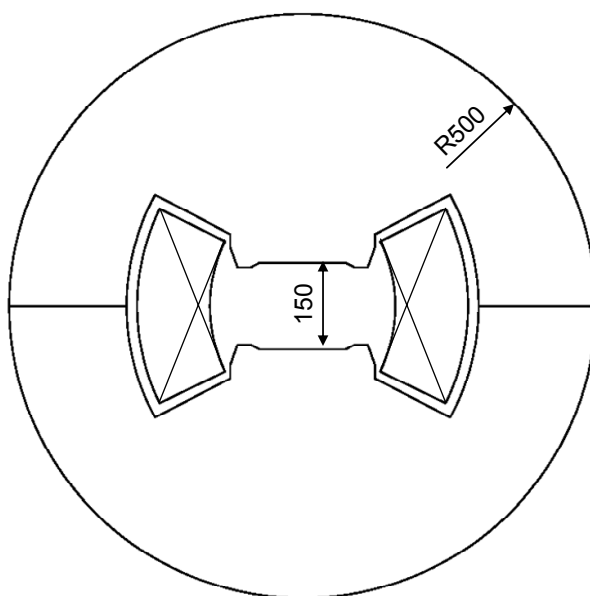


図 4-1-8 : Rapid pitch におけるヘリカルコイルと鉄芯の断面形状

ヘリカルダイポール電磁石の場合、コイルは WF 型を元にデザインしてもその断面形状の変形によって鉄芯は H 型のようにポールピースをもつ形状になってしまう。このようにヘリカルダイポール電磁石は WF 型と H 型の両方の特徴を持つ構造になっている。鉄芯の断面形状からこの構造を新たに M 型電磁石と名付け、特許を取得した。[4-9]

鉄芯の組み立て方法としてヘリカルピッチに合わせて厚さ 0.5mm のケイ素鋼板[4-10]を積み上げていく方式を採用した。また、ケイ素鋼板を用いることによって渦電流を抑え、1.5 秒程度で運転電流のランプアップおよびランプダウンした場合においても、インダクタンスによる電圧増大を低く抑えることができ、電源の許容電圧内で電磁石を運転することが可能となる。

電磁石の構造上、磁極の回転による鉄芯外形への形状的影響を避けるため、鉄芯の外形は通常の四角形ではなく円形にした。実際の組み立てでは半円のケイ素鋼板をヘリカルコイルの両サイドから差し込む方式で行った。外形の半径は加速器架台からビームラインまでの距離と鉄芯内の磁場飽和および電磁石全体の重量を考慮して設計した。図 4-1-9 は鉄芯組み立ての構想図である。ケイ素鋼板の外側には三次元磁場計算で最適化されたヘリカルピッチを正確に再現するためにあらかじめ突起 (tab) がついた設計になっている。この突起をヘリカルガイドに沿わせることで磁極のヘリカルピッチを正確に組み立てることが可能となる。

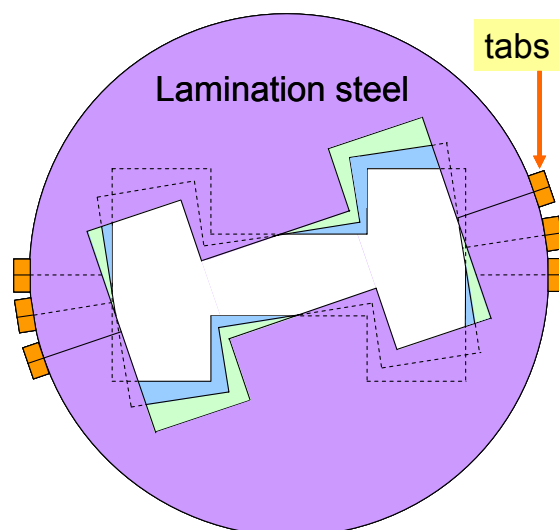


図 4-1-9 : ケイ素鋼板の積層構造

厚さ 0.5mm のケイ素鋼板だけを用いて鉄芯を組み立てた場合、位置や積層率の製作誤差が大きく生じてしまうことが予想された。そのため、本電磁石では鉄芯を 8 個の領域に区分し、それぞれを厚さ 30mm の固定用鉄板で挟み込むことで製作誤差をより少なくする設計にした。図 4-1-10 は電磁石の構造図である。

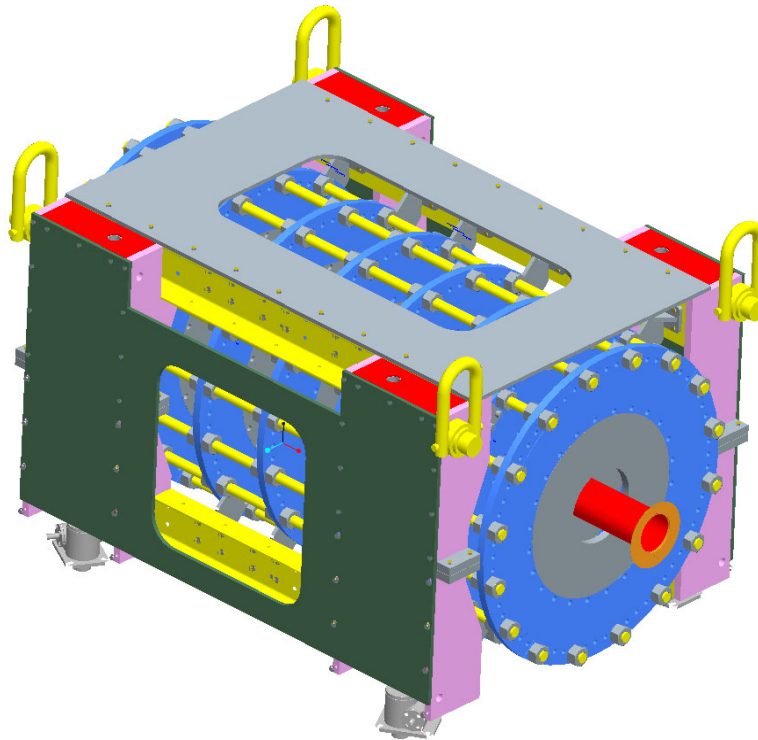


図 4-1-10 : 電磁石の構造図

固定用鉄板はケイ素鋼板を固定する役目のほかに架台に固定される役目も持っている。架台は鉄製であるため直接電磁石に取り付けると磁気回路が乱れてしまう。この問題を防ぐため、固定用鉄板と架台の間にステンレス製のブロックを用いた。架台を含めた電磁石全体の重量は 14600kg である。

以上より、Warm Snake の最終的な仕様を設計条件と比較したものを表 4-1-2 に示す。

表 4-1-2 : 設計条件と最終仕様の比較

	設計条件	最終仕様
最大中心磁場 T	1.5	1.5
電流 A	3000	2670
電圧 V	300	230.9
電力 kW	900	616.5
温度上昇幅 °C	17	15.3
重量 kg	18000	14600

表 4-1-2 に示されているように、すべての仕様は設計条件内に収まっている。この電  
 氣的、機械的仕様をもとに次節において Warm Snake の磁場計算について述べる。

## 4-2 磁場計算

物性研究のように試料を磁極中心に固定して実験を行う場合、電磁石の磁極周辺に生じる漏洩磁場の影響がないため、二次元の磁場計算で十分である。しかしながら、加速器用電磁石の場合、ビームが磁極間を通過するため、漏洩磁場の影響を考慮する必要がある。そのため、より正確なビーム軌道計算を行うため三次元磁場計算が必要となる。特に Warm Snake の場合、ヘリカルダイポール内の螺旋磁場を解析することから三次元磁場計算が非常に重要である。本節では磁場計算コードの種類、磁場特性曲線、ヘリカルダイポール内の三次元磁場計算および螺旋磁場内のビーム軌道について述べる。

### 4-2-1 磁場計算コード

現在おもに使用されている磁場計算コードは有限要素法(Finite Element Method, FEM)が用いられている。これは、ある領域を有限の要素に分割し、それぞれの要素内に多項式を適用し、近似解を得るシミュレーション法である。表 4-2-1 に磁場計算コードの一覧表を示す。

表 4-2-1：磁場計算コード

磁場計算コード	特徴	参考文献
POISSON	二次元・静磁場（フリーソフトウェア）	[4-11]
FEMM	二次元・静磁場（フリーソフトウェア）	[4-12]
OPERA-2D	二次元・静磁場・AC 磁場	[4-13]
OPERA-3D/TOSCA	三次元・静磁場	[4-13]
OPERA-3D/ELEKTRA	三次元・AC 磁場	[4-13]
MAFIA	三次元・静磁場	[4-14]
RADIA	三次元・静磁場（Mathematica が必要）	[4-15]
ANSYS	二次元・三次元・静磁場・AC 磁場	[4-16]

今回は理化学研究所の OPERA-2D および OPERA-3D / TOSCA のソフトウェアライセンスを用いてワークステーション上で磁場計算を行った。

## 4-2-2 磁場特性曲線

磁場計算を行う際、実際に用いる磁性体の磁場特性を計算コードに入力する必要がある。今回の電磁石ではケイ素鋼板と型番 SS400 の鉄材の 2 種類の磁性体を用いる。図 4-2-1 にそれぞれの磁場特性曲線を示す。

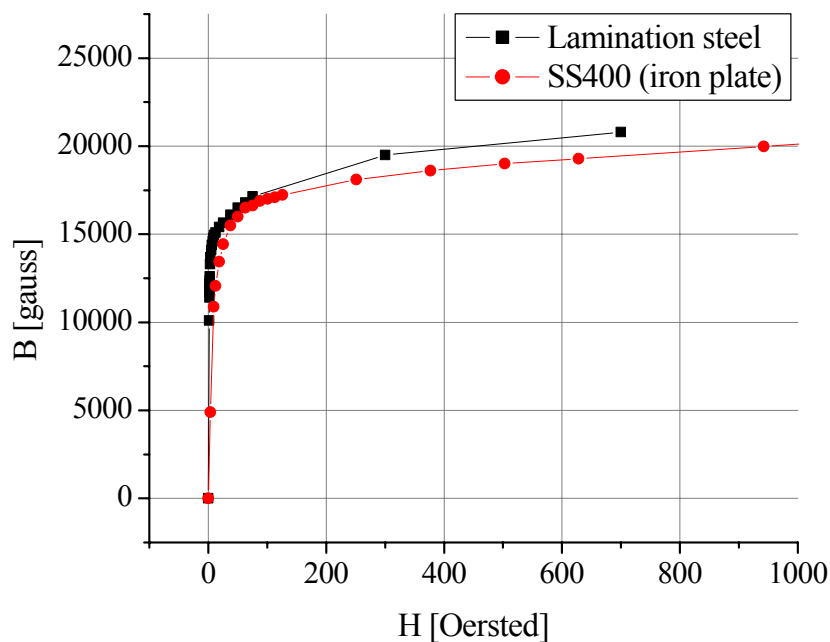


図 4-2-1 : 磁場特性曲線

本電磁石の中心磁場の設計値は 1.5T である。SS400 の鉄材はやや磁場飽和が早く始まるものの、1.5T 付近の磁場強度においてどちらの鉄芯材も問題なく使用することができる。

## 4-2-3 二次元磁場計算

鉄芯内における磁場の飽和と磁極形状の最適化を行うため、OPERA-2D を用いて二次元磁場計算を行った。鉄芯の形状が X 軸および Z 軸に対して対称であることから、磁場計算は電磁石の 1/4 断面のみで行った。図 4-2-2 および図 4-2-3 は Slow pitch 領域および Rapid pitch 領域における鉄芯内の磁場を示す。

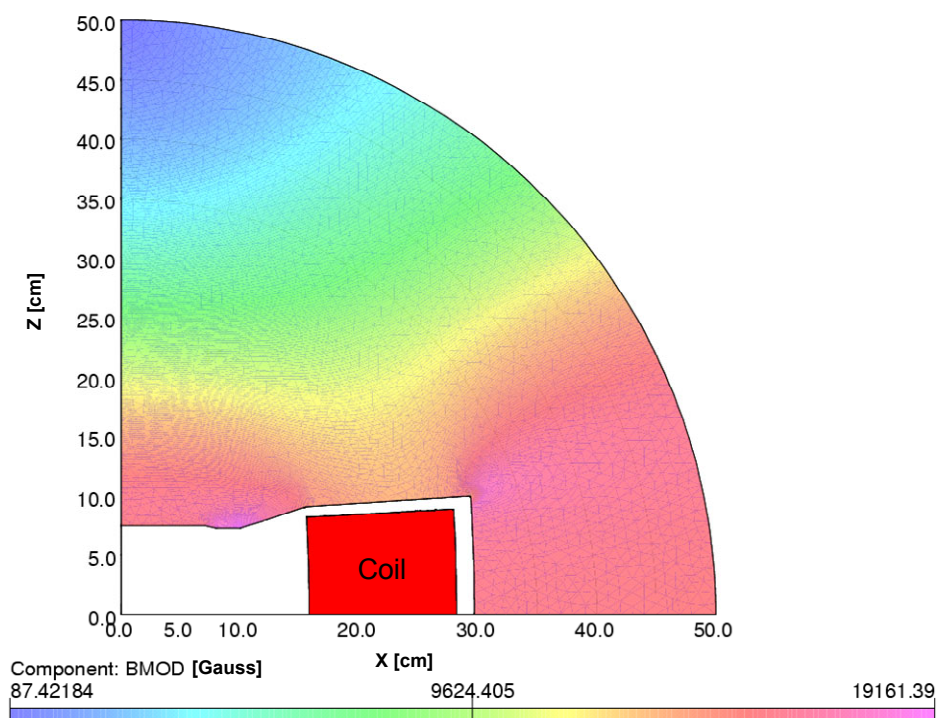


図 4-2-2 : Slow pitch 領域における鉄芯内の磁場

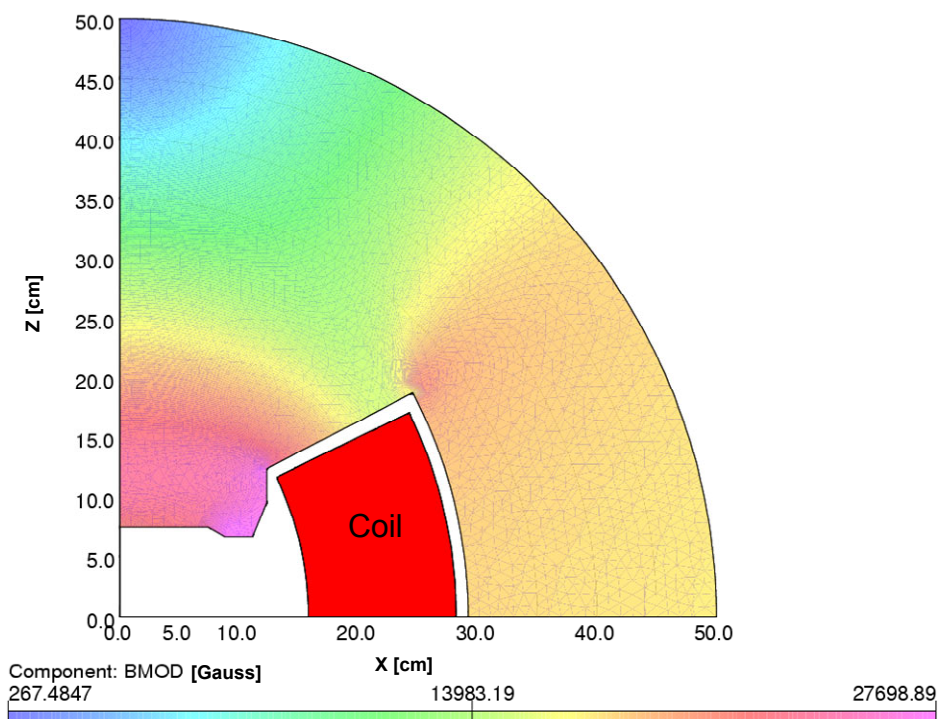


図 4-2-3 : Rapid pitch 領域における鉄芯内の磁場

X 軸上の電磁石中心から 50cm の点における磁場はいずれの領域においても 1.5T 程度であり、鉄芯の磁場飽和による漏洩磁場は少ない。

図 4-2-2 および図 4-2-3 における磁極の形状は磁場の多極成分を最適化した結果である。表 4-2-1 に各領域における各磁場成分を示す。

表 4-2-1 : 多極磁場成分

磁場成分	Slow pitch	Rapid pitch
2 極成分	1.56T	1.54T
6 極成分/2 極成分	-5.8unit	-2.2unit
8 極成分/2 極成分	-7.9unit	-7.6unit
10 極成分/2 極成分	-3.1unit	-6.6unit

この多極成分分解における単位 unit は(各成分磁場)[Tesla]/(中心の 2 極成分磁場)[Tesla]を 10000 倍したものである。通常±10unit 以内に収まることが望ましい。

#### 4-2-4 三次元磁場計算

三次元磁場計算の目的はヘリカルダイポール内の磁場をより正確に計算し、この磁場内を通る陽子ビームの螺旋軌道を電磁石出口におけるビームの出射位置のオフセットと出射角度を持たないように最適化することである。計算コードは OPERA-3D / TOSCA を用いた。またケイ素鋼板は厚さ 0.5mm であるが、板の両面に厚さ 0.005mm のシリコンでコーティングされている。したがって、ケイ素鋼板の積層率は 98%として磁場計算を行った。図 4-2-4 に三次元磁場計算用モデルを示す。

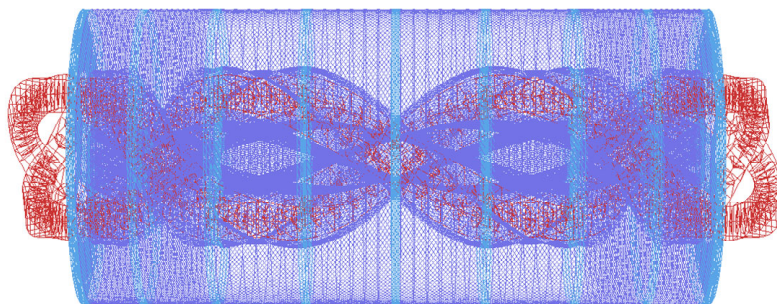


図 4-2-4 : Warm Snake の三次元磁場計算モデル (赤 : ヘリカルコイル、青 : 鉄芯)

三次元モデルの要素数（メッシュ数）は約 880000node であり、一回あたりの計算時間はワークステーションを用いて約 12 時間であった。

陽子ビーム軌道の最適化のため、Warm Snake は一体の電磁石内に 2 つの異なるヘリカルピッチを持つ。このヘリカルピッチとその長さを最適化することで理想的な陽子ビームの螺旋軌道を得ることができる。ここで、最適化に用いた陽子ビームのエネルギーは AGS 加速器の入射エネルギーに近い 2GeV とした。これはビームエネルギーが低いほど磁場による軌道の影響が大きく反映されるため、より高い精度で磁場の最適化を行う目的のためである。最適化のためのパラメータとなりうる変数を以下に示す。

- a. 鉄芯の全長
- b. Rapid pitch 領域の長さ
- c. Rapid pitch 領域のヘリカルピッチ
- d. Slow pitch 領域の長さ
- e. Slow pitch 領域のヘリカルピッチ

これらの変数のうち 2 つだけを最適化のためのパラメータとするため、a. 鉄芯の全長を 2100mm、b. Rapid pitch の長さを 390mm、c. ヘリカルピッチを 0.4degree/mm と固定し、d. と e. の Slow pitch 領域の長さ とヘリカルピッチのみを変数とした。その結果、Slow pitch 領域の長さは 1320mm、ヘリカルピッチは 0.196degree/mm となった。最適化された 2GeV 陽子ビームの螺旋軌道を図 4-2-5 に示す。また図 4-2-6 にビーム軌道を最適化したときのヘリカルダイポール内の磁場計算結果を示す。

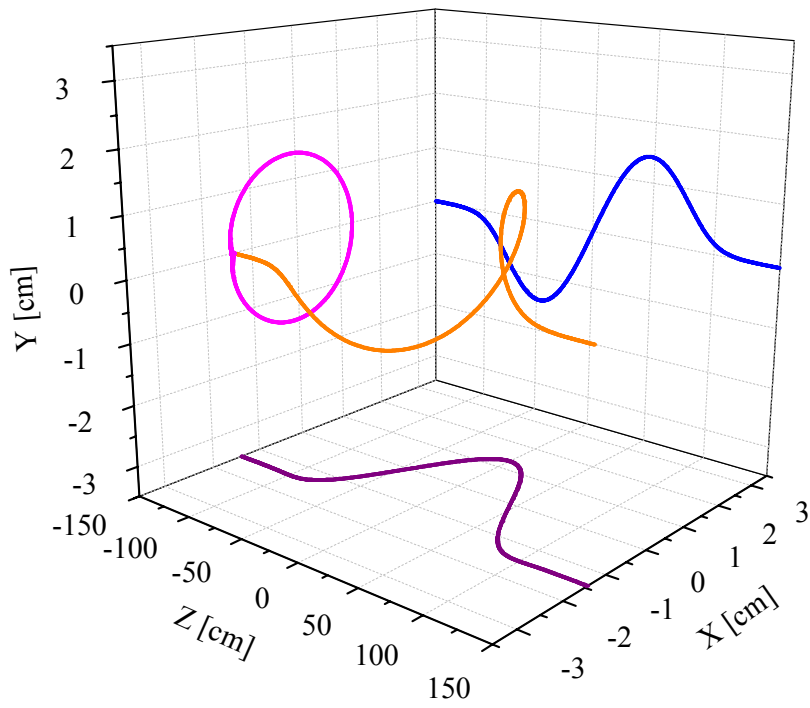


図 4-2-5 : ヘリカルダイポール磁場内における 2GeV 陽子ビームの螺旋軌道

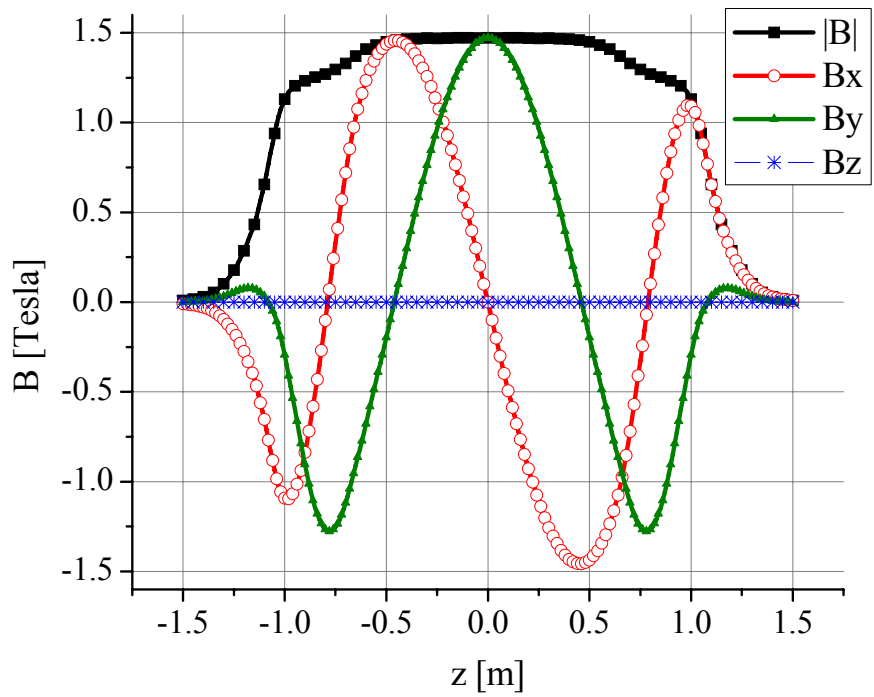


図 4-2-6 : 最適化されたヘリカルダイポール内の磁場分布

図 4-2-6 から Rapid pitch 領域における磁場の絶対値が Slow pitch 領域に比べて低いことがわかる。これは Rapid pitch 領域における鉄芯の体積が Slow pitch 領域より小さいため、より早く磁場飽和が生じてしまい、鉄芯内の磁気力線が電磁石両端の Rapid pitch 領域から Slow pitch 領域に向かって集まってしまうためである。

次に、ヘリカルダイポール内の磁場の向きを計算結果を図 4-2-7 に示す。

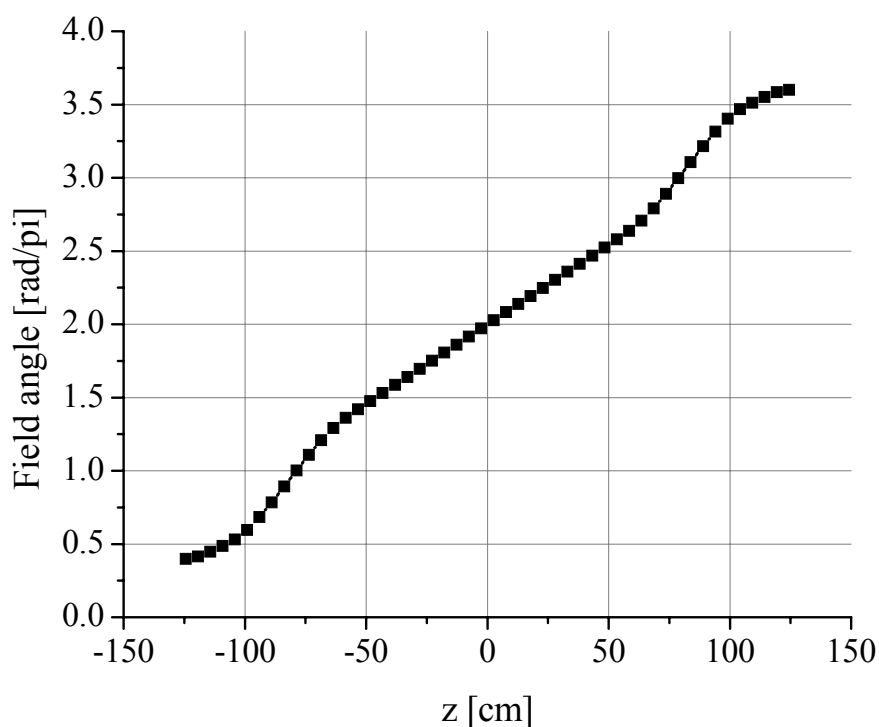


図 4-2-7 : ヘリカルダイポール内の磁場の向き

図 4-2-7 からヘリカルダイポール内の磁場の向きはヘリカルピッチに沿って変化していることがわかる。

磁場測定ではハーモニックコイルを用いるため磁場の多極成分を測定することができる。ハーモニックコイルについては第 5 章で詳しく述べる。このハーモニックコイル [4-17] を擬似的に OPERA-3D / TOSCA 上でモデル化し、多極成分の磁場解析を行った。図 4-2-8 から図 4-2-10 はヘリカルダイポール内の 2 極、6 極、10 極磁場成分の分布である。

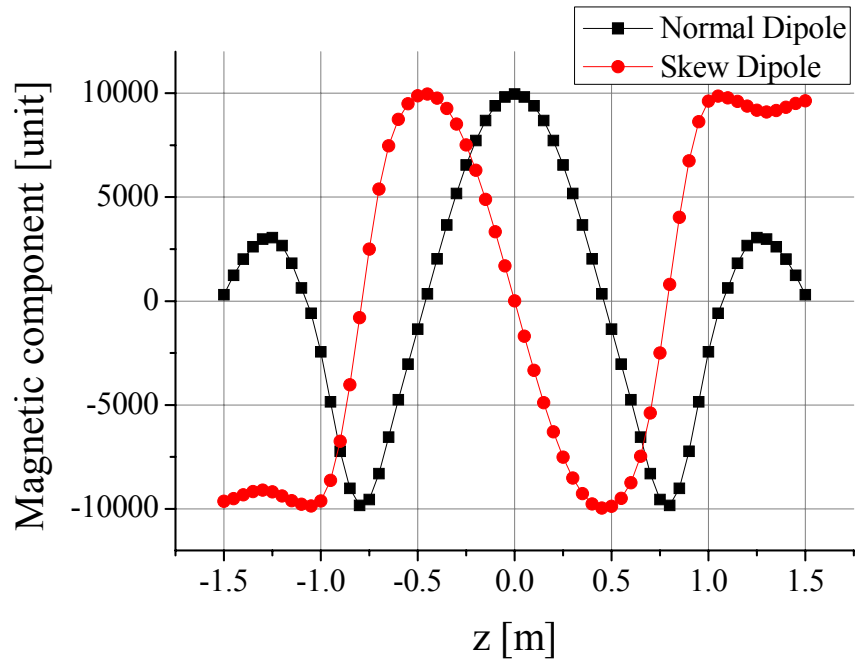


图 4-2-8 : 2 極磁場成分分布

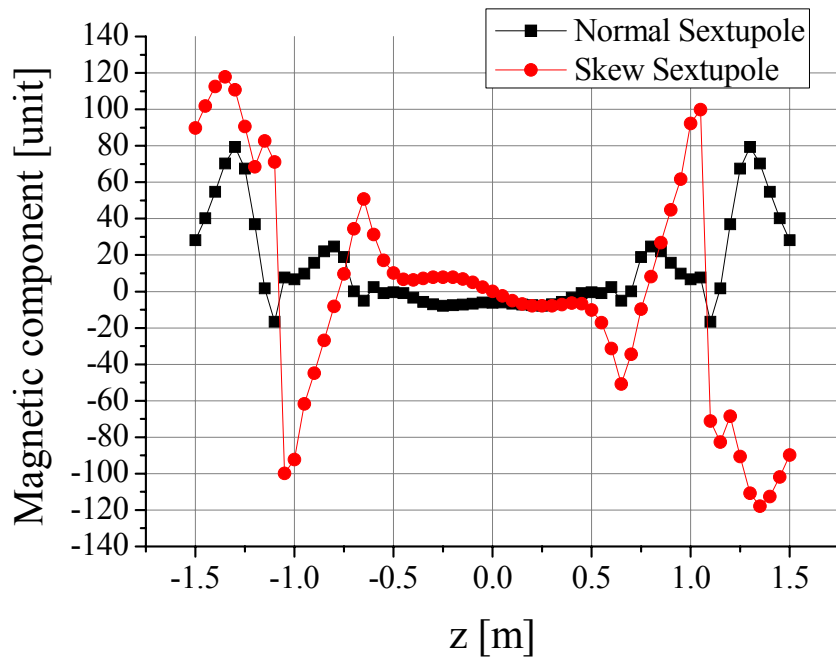


图 4-2-9 : 6 極磁場成分分布

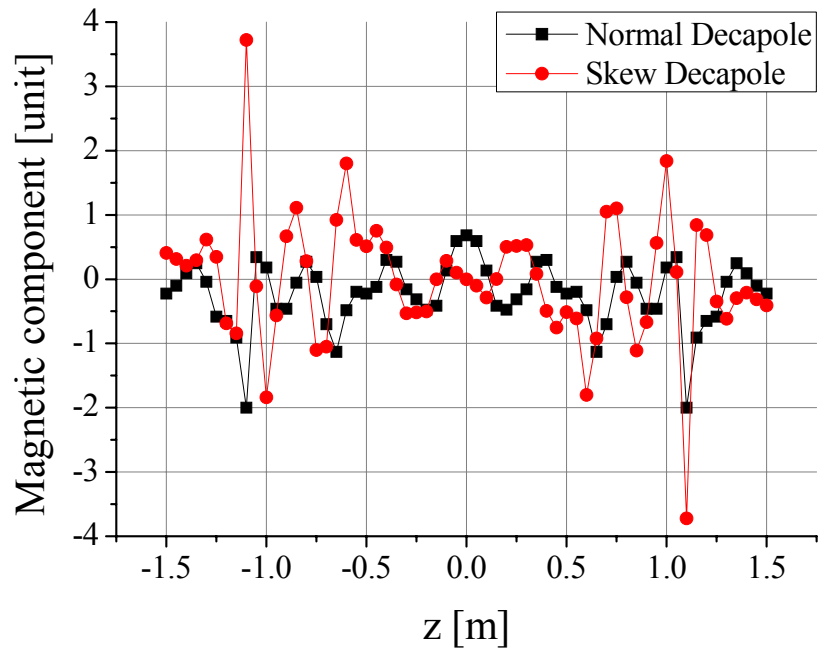


図 4-2-10 : 10 極磁場成分分布

以上の磁場の強度、向き、多極成分についての計算結果と磁場測定の結果の比較および考察は第 5 章で行う。

## 4-3 電磁石の製作

本節では 4-1 と 4-2 で行ってきた設計および三次元磁場計算をもとに電磁石の製作過程を中心に述べる。4-3-1 では実機製作前に行った 1/5 スケールモデルの製作について述べる。これはヘリカルダイポールの構造を実物で理解し、製作上の問題点を実機製作前に解決するために非常に有用であった。4-3-2 では実機用ヘリカルコイルの巻線過程について述べる。4-3-3 では実機の組み立てについて述べる。4-3-4 では実機完成後の検査および製作誤差について説明する。4-3-5 では製作誤差を考慮した三次元磁場計算の結果について述べる。

### 4-3-1 1/5 スケールモデル

実機を製作する前に 1/5 スケールモデルを作ることで電磁石製作過程の確認を行った。

図 4-3-1 は 1/5 スケールのヘリカルコイルの巻線作業の写真である。

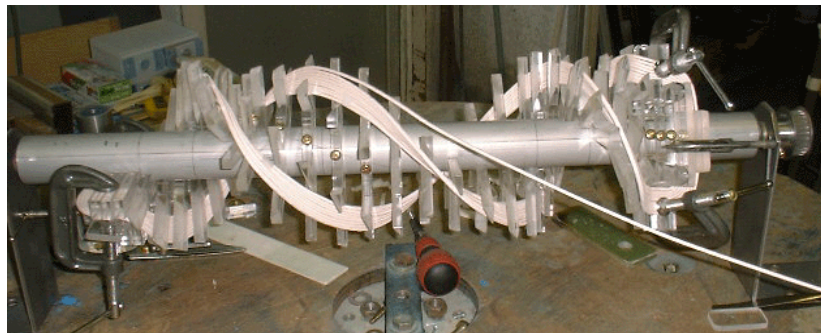


図 4-3-1 : 1/5 スケールヘリカルコイルの巻線過程

巻線器はターンテーブル、回転パイプ、巻型から構成されている。回転パイプはターンテーブル上にあり、巻型はヘリカルピッチに合わせて回転パイプ上に配置されている。この時点では温度上昇を考慮していなかったため、本章 4-1-2 にて説明したパラレルワインディング法ではなくシングルワインディングで巻線を行った。また、ダブルピッチ構造に関しても三次元磁場計算によるピッチの最適化の前であったため、実機のヘリカルピッチとは異なるものの、1/5 スケールヘリカルコイルにおいてもダブルピッチ構造を持つように製作した。このようにして完成した 1/5 スケールヘリカルコイルの写真を図 4-3-2 に示す。

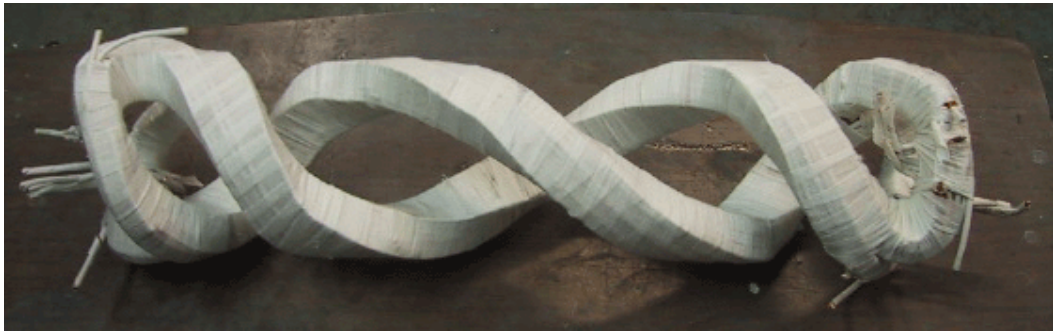


図 4-3-2 : 1/5 スケールヘリカルコイル

このヘリカルコイルに対し鉄芯に見立てた亚克力板を半分だけ組み込んだ。図 4-3-3 は全体の写真とビーム進行方向の正面からみた写真である。

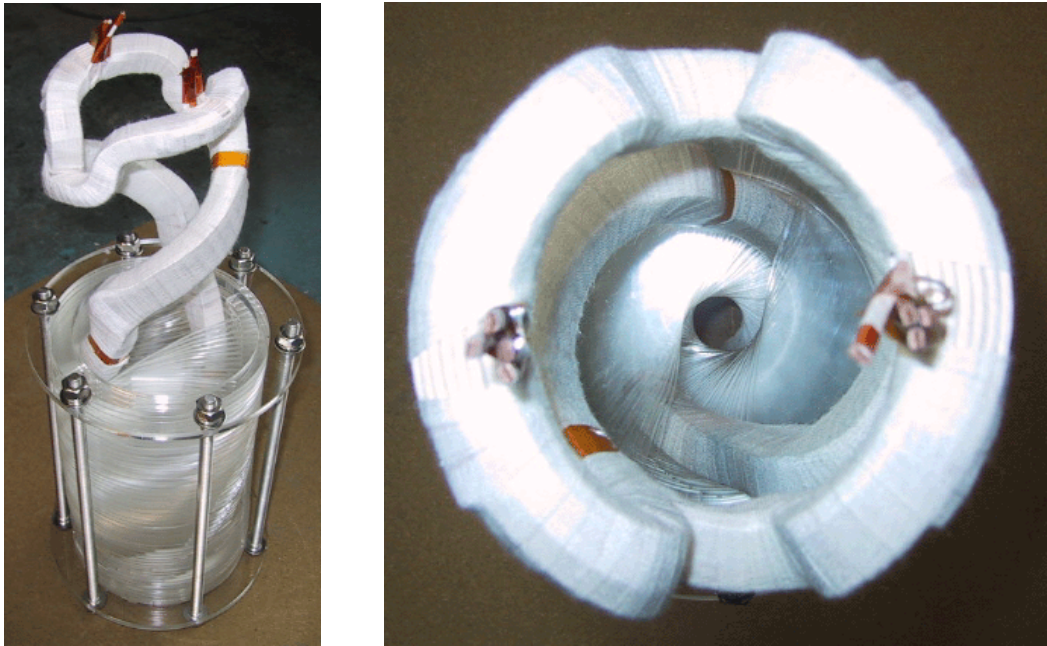


図 4-3-3 : 1/5 スケールモデル

亚克力板は半円形状をしており、直立させたヘリカルコイルの両脇から差し込むようにして積み上げる手順で組み立てた。本モデルでは亚克力板のヘリカルピッチはコイルに沿うように組み立てたが、本来ヘリカルダイポール内の螺旋磁場はポールピースの向きで決まるため、鉄芯のヘリカルピッチをガイドする構造が必要である。また、亚克力板は両端の固定用板で挟みこんで固定する方式を取ったが、積み上げる亚克力

板の数が増えたとき、アクリル板の位置精度が雑になってしまう問題点があった。実機の製作ではこれらの問題点を解決した方法を取った。

### 4-3-2 ヘリカルコイルの巻線

実機用ヘリカルコイルの巻線器の写真を図 4-3-4 に示す。



図 4-3-4 : ヘリカルコイル巻線器

巻軸は焼鈍された鉄製のパイプを加工したものをを用いた。半径方向の製作精度は  $1/100\text{mm}$  である。焼鈍されていないパイプを加工した場合、パイプ内に残る応力によるゆがみが生じてしまうため、巻軸の高精度な加工が困難となる。この巻軸上には本章第 2 節で得られたヘリカルピッチに沿って巻型を固定するピン用の穴が加工された。図 4-3-5 にピン穴の展開図を示す。

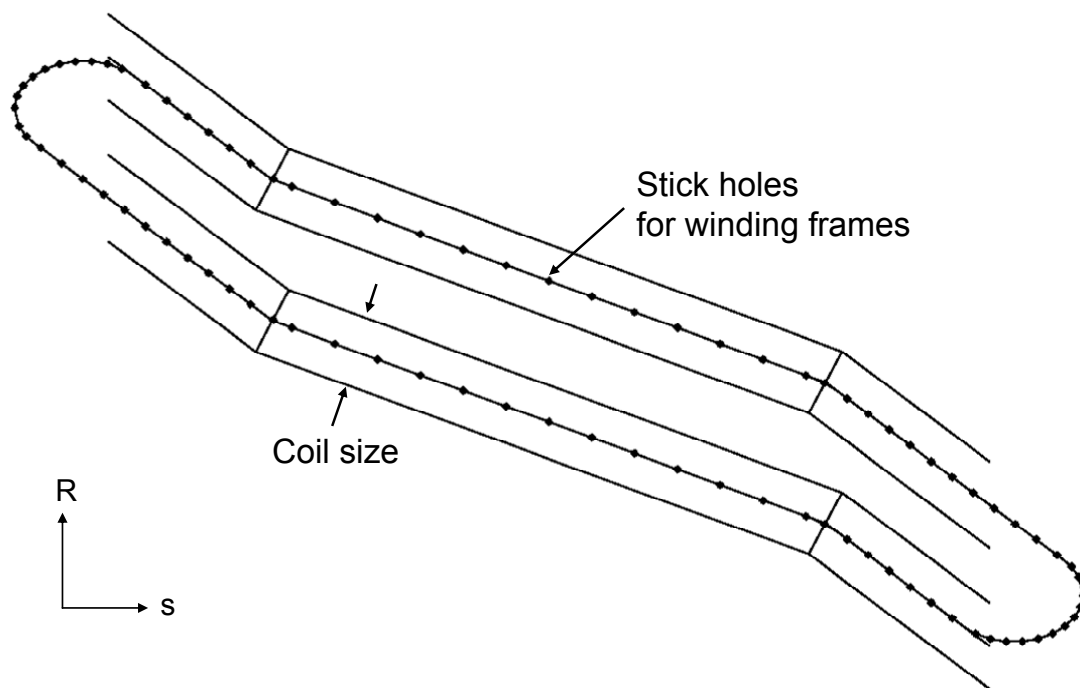


図 4-3-5 : 巻型固定用ピン穴の展開図

この設計図をもとに 1/00mm の精度で巻軸上にピン穴の加工を行った。このピン穴に沿って図 4-3-6 に示されているような巻型を取り付けた。巻型は L 字型のブロックを重ね合わせてコの字型にしたものを用いた。これはヘリカルコイル完成後に巻型を分割し、ヘリカルコイルからの取り外しを容易にするためである。

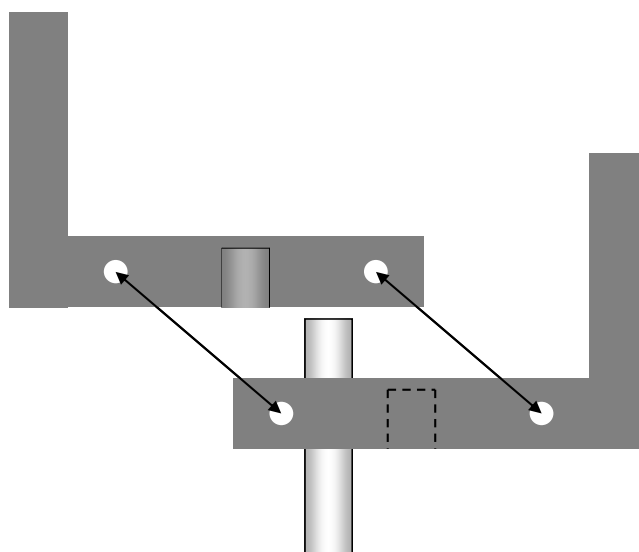


図 4-3-6 : 巻型の構造

巻型のコイルに接する面には巻線作業の際にホローコンダクターの素線絶縁を傷つけないように厚紙を貼り付けた。この厚紙の厚さも考慮して巻型は設計されている。図4-3-7は巻軸上の巻型の写真である。

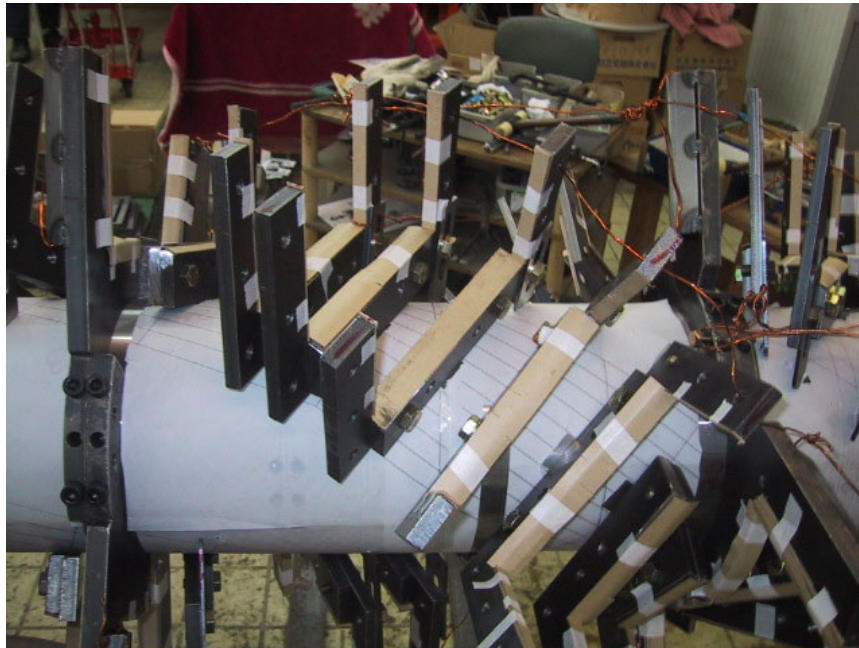


図 4-3-7 : 巻軸上の巻型

ホローコンダクターの素線絶縁は厚さ 0.17mm のセミキュアテープと厚さ 0.18mm のノーマックステープを用いた。セミキュアテープとはガラス素材のテープにマイラー（雲母）が片面に塗られているものである。これらのテープをそれぞれ図 4-3-8 のようにハーフラップ方式でホローコンダクターに巻きつけた。

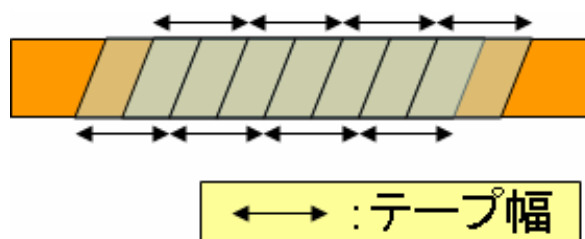


図 4-3-8 : ハーフラップ方式

素線絶縁によってホローコンダクターのサイズが 14.5mm×14.5mm から 15.9mm×15.9mm に大きくなった。さらにヘリカルコイルの素線巻線完了後、コイルの外周にセミキュアテープとノーメックステープをそれぞれ 2 回ずつハーフラップ方式でテーピングを行った。したがって、コイル全体のサイズは 111.3mm×159mm となる。

以上のように、巻線器と素線絶縁の準備を行った後、実機用ヘリカルコイルの巻線作業を行った。図 4-3-9 は本章第 1 節で紹介したパラレルワインディング法を用いて巻線を行っているところの写真である。

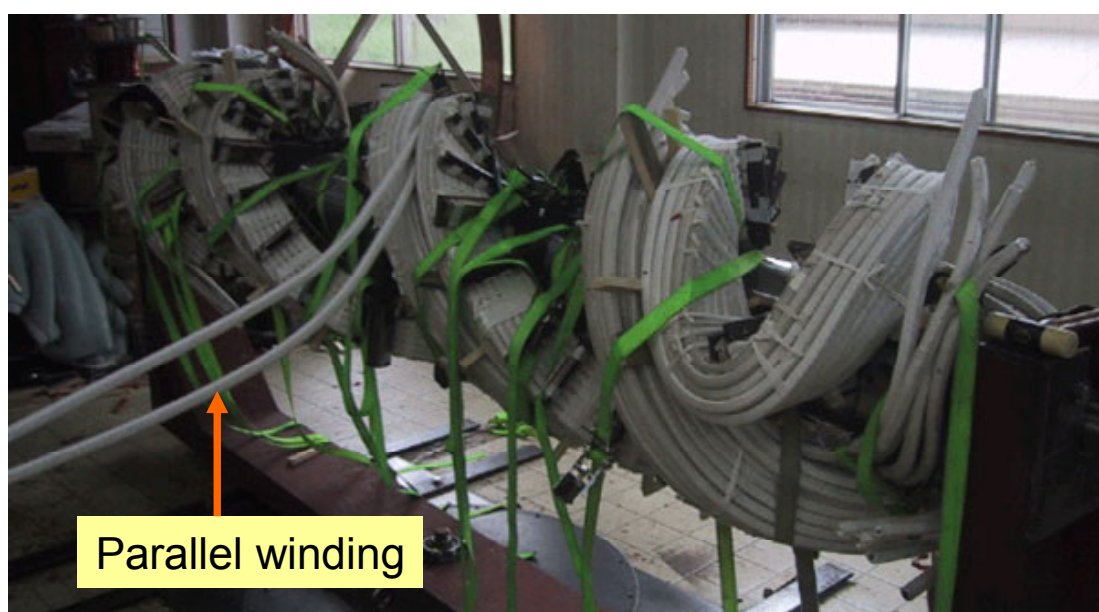


図 4-3-9 : パラレルワインディング

1 ターン分の巻線が完了するごとに素線同士および素線と巻型の間には 1kV の電圧をかけて耐電圧試験を行い、絶縁が保たれていることを確認しながら巻線作業を行った。また、各コイルの抵抗の測定平均値は 86.2mΩ であり、設計値の 87mΩ とほぼ一致している。このコイルの測定値より、必要電圧および電力は 230V、615kW となる。図 4-3-10 は素線巻線完了時の写真である。



図 4-3-10 : 素線巻線完了

素線の巻線作業が終了した後、素線間の絶縁効果を高めるため素線絶縁テープにエポキシ樹脂を流し込んだ。その際には、冷却水なしで約 200A の電流をコイルに流し、コイルの温度を約 80℃に 10 時間程度保つことでエポキシ樹脂を固めた。またエポキシ樹脂が偏らないように随時巻軸を回転させた。その後、セミキュアテープとノーメックステープを用いてコイルの外周テーピングを施した。外周テープに対してもエポキシ樹脂を流し込みコイル全体を固めた。図 4-3-11 は完成したヘリカルコイルの写真である。



図 4-3-11 : 完成したヘリカルコイル

### 4-3-3 実機組み立て

完成したヘリカルコイルは鉄芯組み込みのため直立状態で組み立て架台に設置された。図 4-3-12 は組み立ての構想図と固定用鉄板内で直立しているヘリカルコイルの写真である。

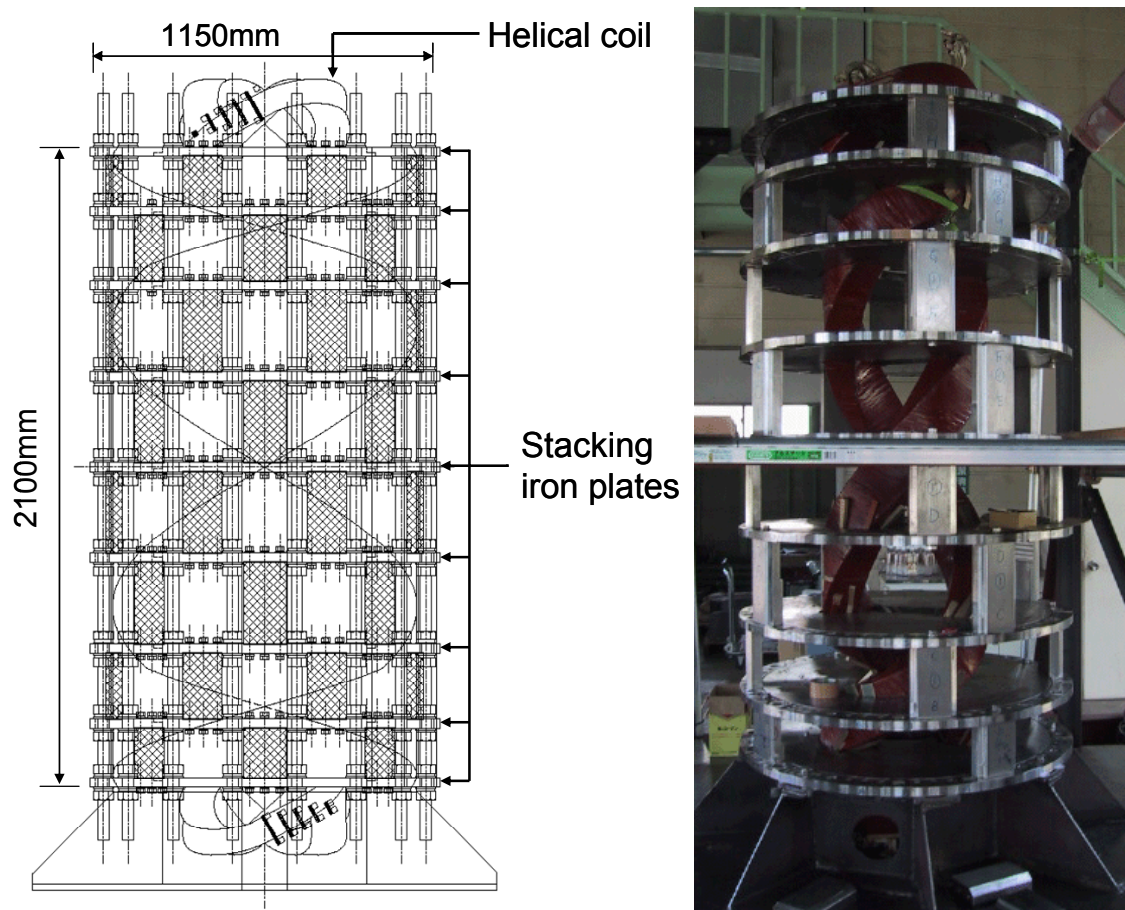


図 4-3-12：組立構想図（左図）と固定用鉄板内のヘリカルコイル（右図）

ヘリカルコイルと固定用鉄板の間は G10 ブロックで固定されている。各固定用鉄板間にはステンレス製のブロックが挿入されている。図 4-3-13 に固定用鉄板の設計図を示す。

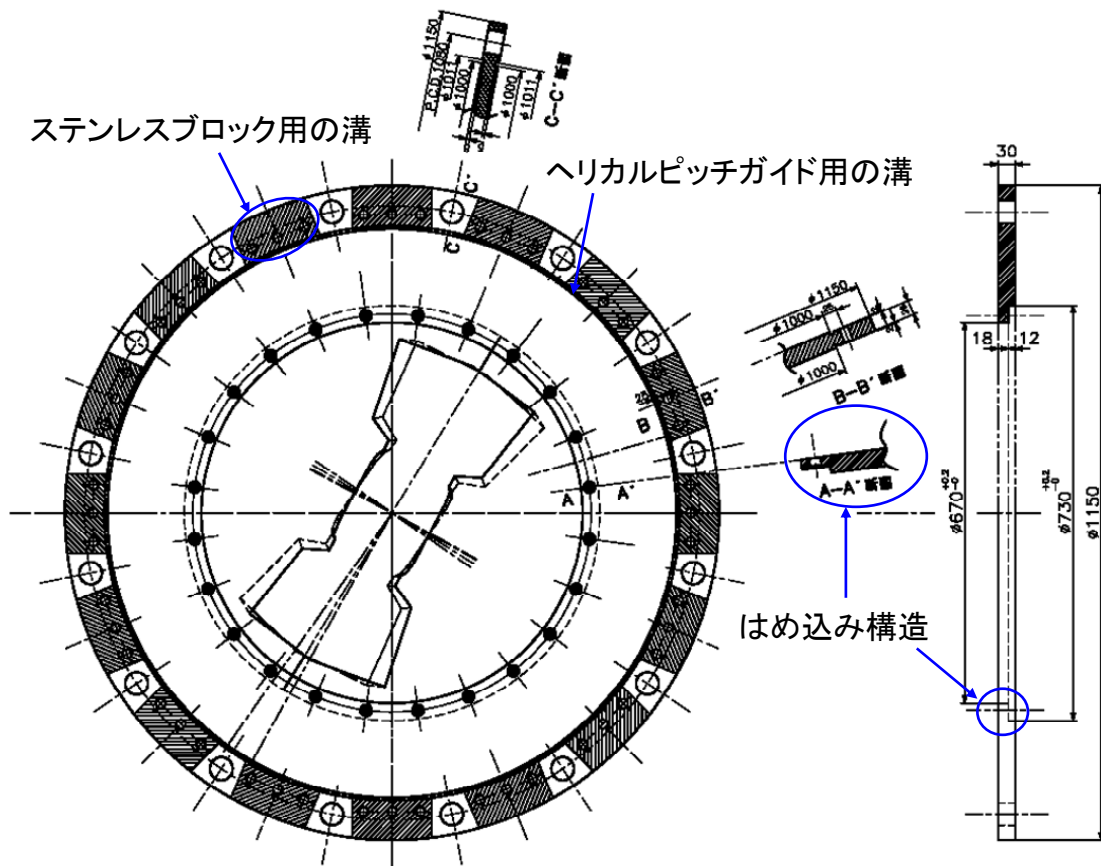


図 4-3-13 : 固定用鉄板

固定用鉄板は外側のリングに半円形のポールピースをはめ込む構造になっている。内側のポールピースを固定するネジ穴の角度は前節の三次元磁場計算で得られた最適なヘリカルピッチを正確に実現できるように設計した。固定用鉄板間の鉄芯を構成するケイ素鋼板は図 4-3-14 のようにステンレス製のヘリカルピッチガイドに沿わせるようにして理想的なヘリカルピッチを実現できるような構造になっている。その他の図面は付録 3 を参照。

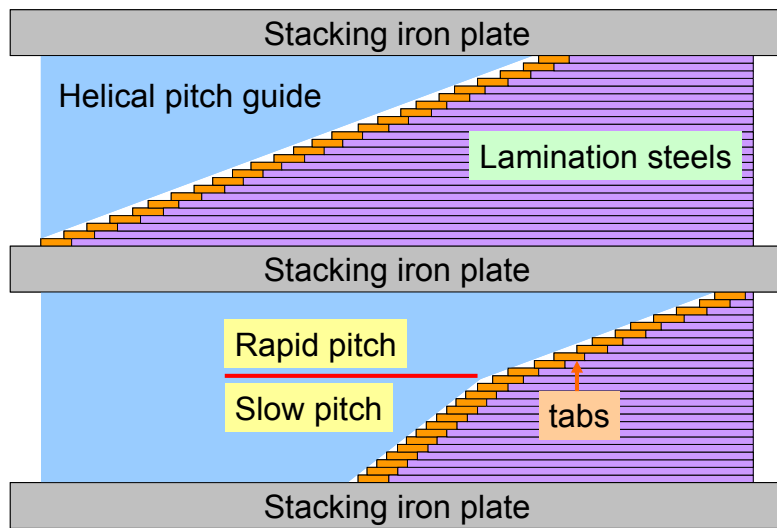


図 4-3-14 : ヘリカルピッチガイドを用いたケイ素鋼板の積層構造

このヘリカルピッチガイド用の溝は図 4-3-13 に示されているように固定用鉄板の外側リングの両面に設計されている。またこのガイドはケイ素鋼板を正確に円筒状に積み上げるためのガイドの役目も持っている。ケイ素鋼板を理想的なヘリカルピッチに沿わせるためのステンレス製ヘリカルピッチガイドを固定するための溝が固定用鉄板の外枠リングに設計されている。このガイドにケイ素鋼板にあらかじめ設計されていた突起に沿わせることでケイ素鋼板の正確なヘリカルピッチを実現することができる。図 4-3-15 は実際に 1 段分だけ積み上げたケイ素鋼板の写真である。

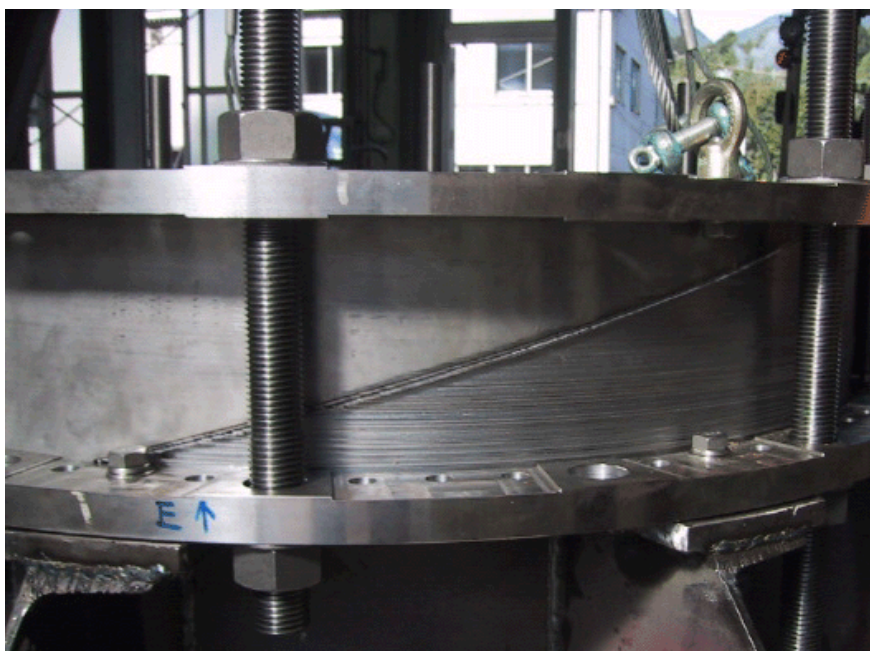


図 4-3-15 : ケイ素鋼板とヘリカルピッチガイド

上下の固定用鉄板でケイ素鋼板を固定した後、ヘリカルピッチガイドとケイ素鋼板の突起は溶接され完全に固定された。

この工程においてケイ素鋼板を一番下から積み上げた場合、製作誤差が上端にだけ生じてしまい、電磁石の対称性が損なわれてしまうことが予想された。したがって、ケイ素鋼板は電磁石の中央から積み上げ、上半分が完成した後、天地を逆転させ、残りの半分を積み上げていく方式を採った。積層工程が終了した後、ビームラインに設置するための架台が取り付けられ、本電磁石の製作過程が完了した。図 4-3-16 は完成した電磁石の全体写真、図 4-3-17 は本電磁石内のヘリカルダイポールの写真である。

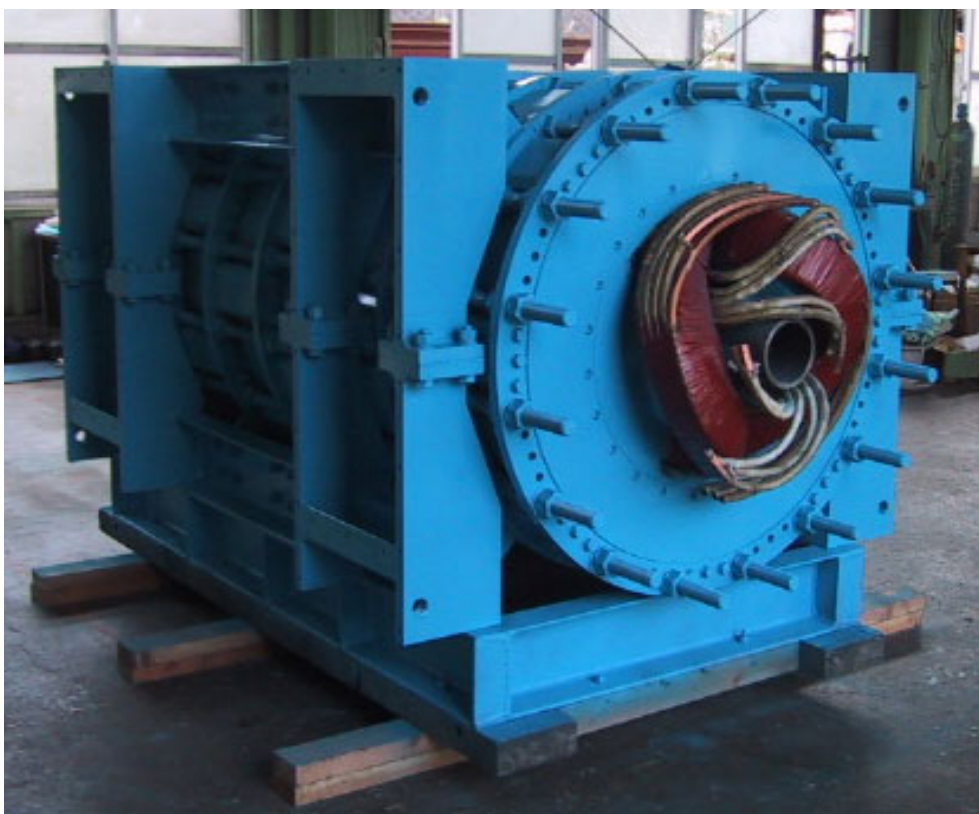


図 4-3-16 : 完成した常電導ヘリカルダイポール型 Siberian Snake 電磁石

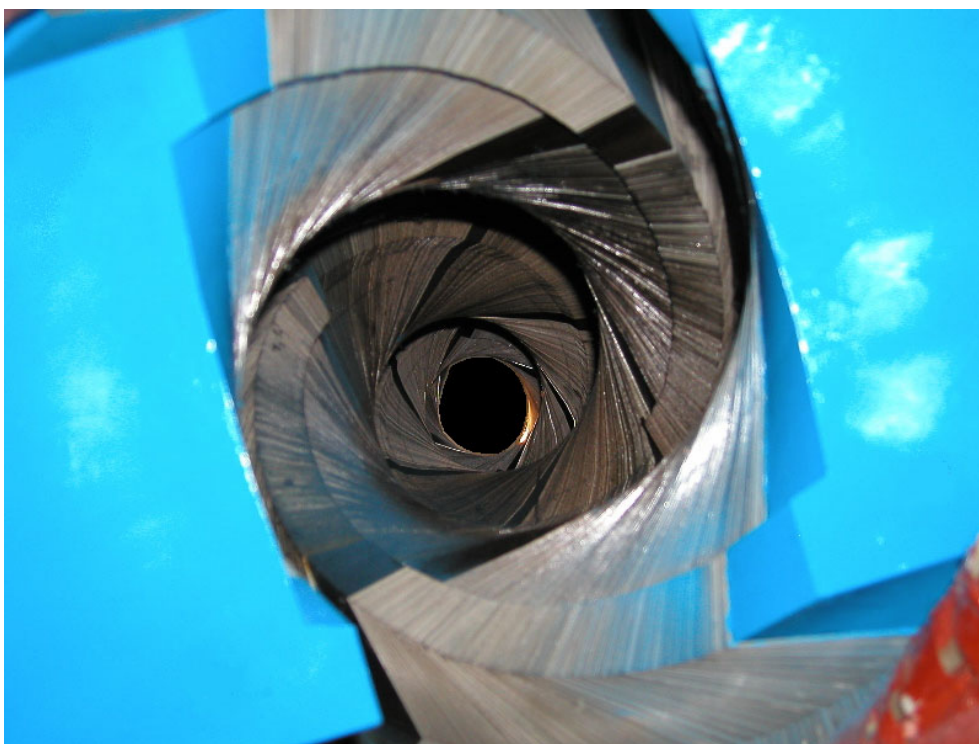


図 4-3-17 : ヘリカルダイポール

#### 4-3-4 検査および製作誤差

最初に最も重要であるポールピースの製作誤差の検査を行った。ヘリカルダイポールの磁極間隙に外径 148mm、長さ 3m のパイプを挿入し、磁極間隔の製作誤差が 0.1%以内であることを確認した。しかしながら、電磁石両端部分のポールピースが外側に 8mm 膨らんでいることが分かった。これは電磁石全長の 0.76%に相当する誤差である。この誤差によるヘリカルダイポール内の磁場への影響についてはセクション 4-3-6 にて検討する。

次にヘリカルコイルの対水圧試験を行った。設計水圧の  $15\text{kg/cm}^2$  より高い  $20\text{kg/cm}^2$  の水圧を 8 時間かけ続け、水路口金付近で水漏れがないことを確認した。また、電気的な検査としてヘリカルコイルと鉄芯の間に 1kV の電圧をかけることで耐電圧試験を行い、絶縁が保たれていることを確認した。電磁石全体の重量は設計値 14600kg に対して測定値は 14500kg であった。

#### 4-3-5 温度上昇測定

冷却水の温度上昇測定では Warm Snake の運転電流に近い 2700A で行った。図 4-3-18 はヘリカルコイルの入口および出口における冷却水の温度測定値のプロットである。

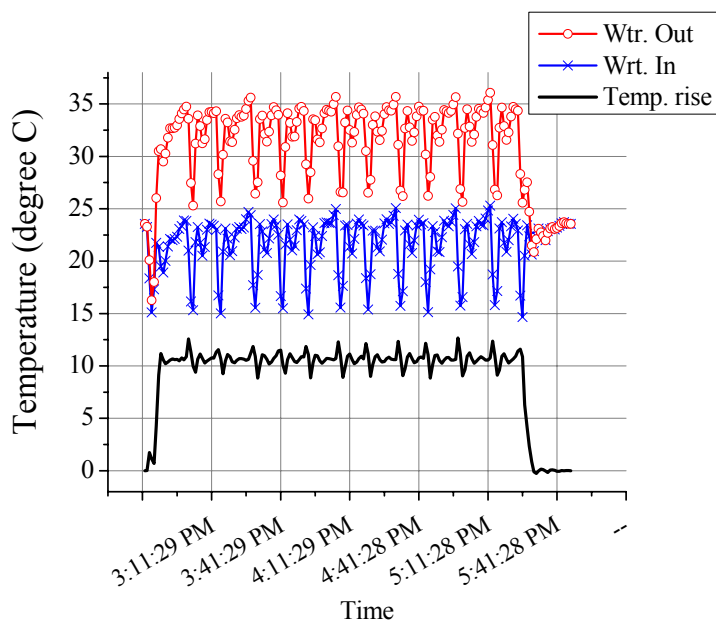


図 4-3-18 : 冷却水の温度上昇幅の測定結果

水温の測定値が周期的に変化しているのは冷却設備のチラーによる影響によるものである。今回の測定では水圧を予定の  $15\text{kgf/cm}^2$  より高い  $20\text{kgf/cm}^2$  で行ったため想定温度上昇幅は  $13.2^\circ\text{C}$  となる。しかしながら、温度上昇幅の測定平均値は  $10.5^\circ\text{C}$  であった。これはコイル表面における自然空冷の効果によるものであると考えられる。図 4-3-19 はヘリカルコイル折り返し付近のコイル表面の温度の測定結果である。

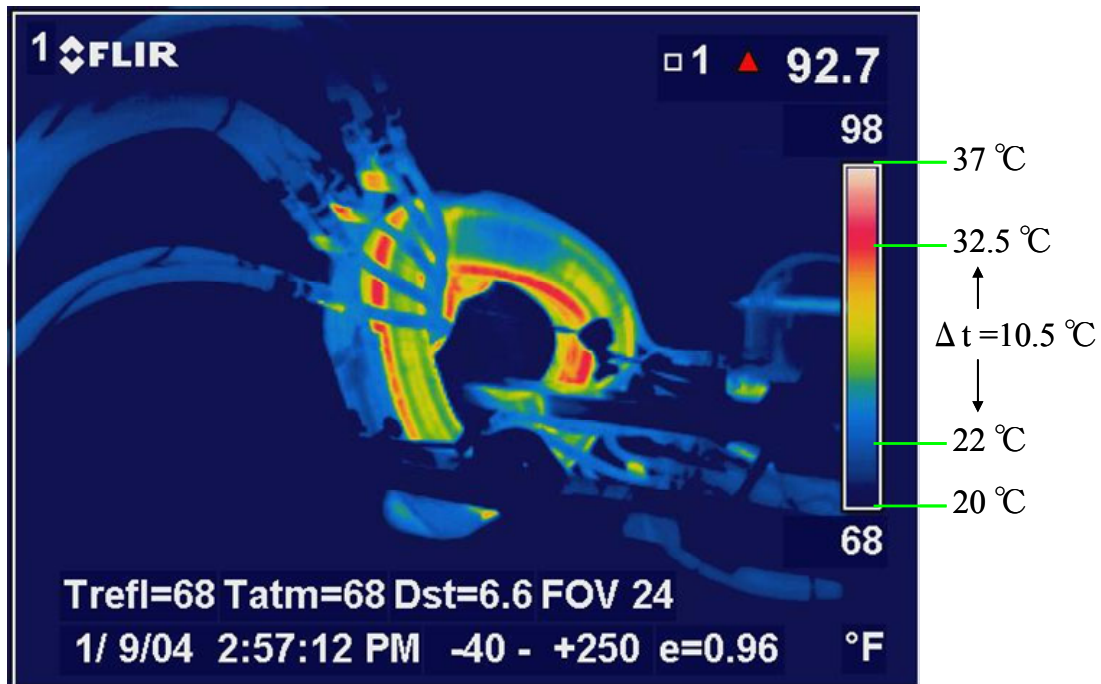


図 4-3-19 : ヘリカルコイル折り返し付近のコイル表面温度

#### 4-3-6 製作誤差を考慮した三次元磁場計算

電磁石両端におけるポールピースの膨らみによってビームに対する有効磁場の長さが長くなると共にケイ素鋼板の積層率が減少してしまう。前セクションで行った検査の結果より、Rapid pitch 領域の長さを  $390\text{mm}$  から  $398\text{mm}$  へ修正し、同領域内のケイ素鋼板の積層率を  $98\%$  から  $96.3\%$  に変更して再度三次元磁場計算を行った。図 4-3-20 は第 2 節で得られた理想的な磁場分布と製作誤差を考慮した磁場計算結果を比較したプロットである。

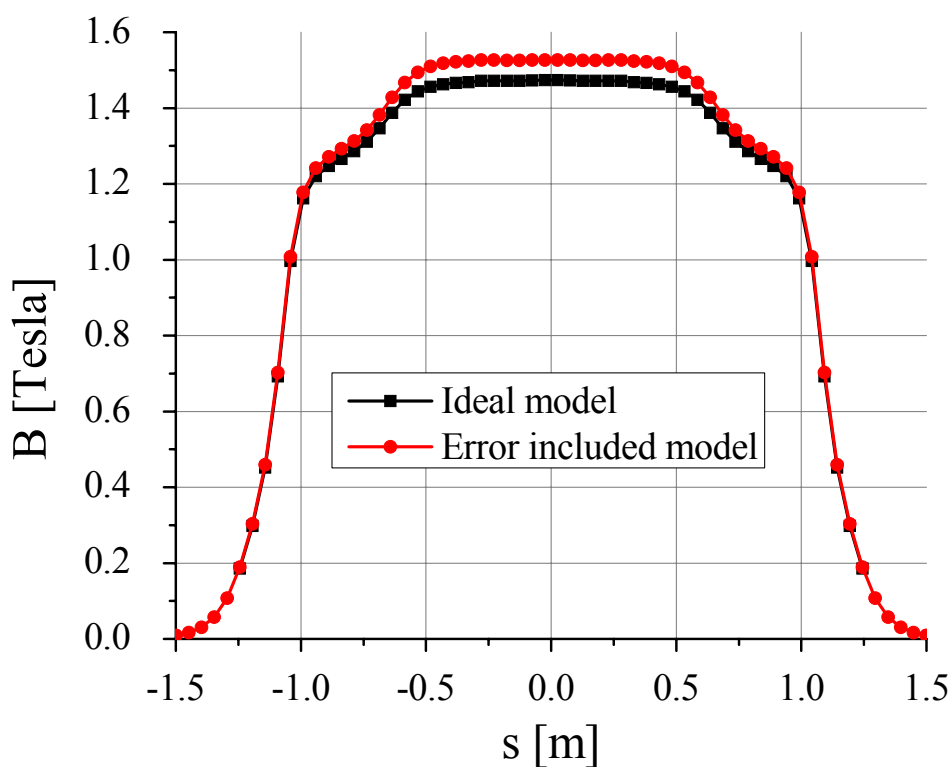


図 4-3-20：最適な磁場と製作誤差を含む磁場の計算結果の比較

上記の計算結果から、同じ電流であっても Rapid pitch 領域におけるケイ素鋼板の積層率が減ることによって磁場が強くなることが分かる。これは図 4-3-21 に示すように、鉄芯が螺旋状であるため鉄芯内を s 方向に向かって磁気ベクトルが向かっていることに加え、積層率が減少した Rapid pitch 領域から Slow pitch 領域に向かって鉄芯内でより強い磁気ベクトルが生じるためである。

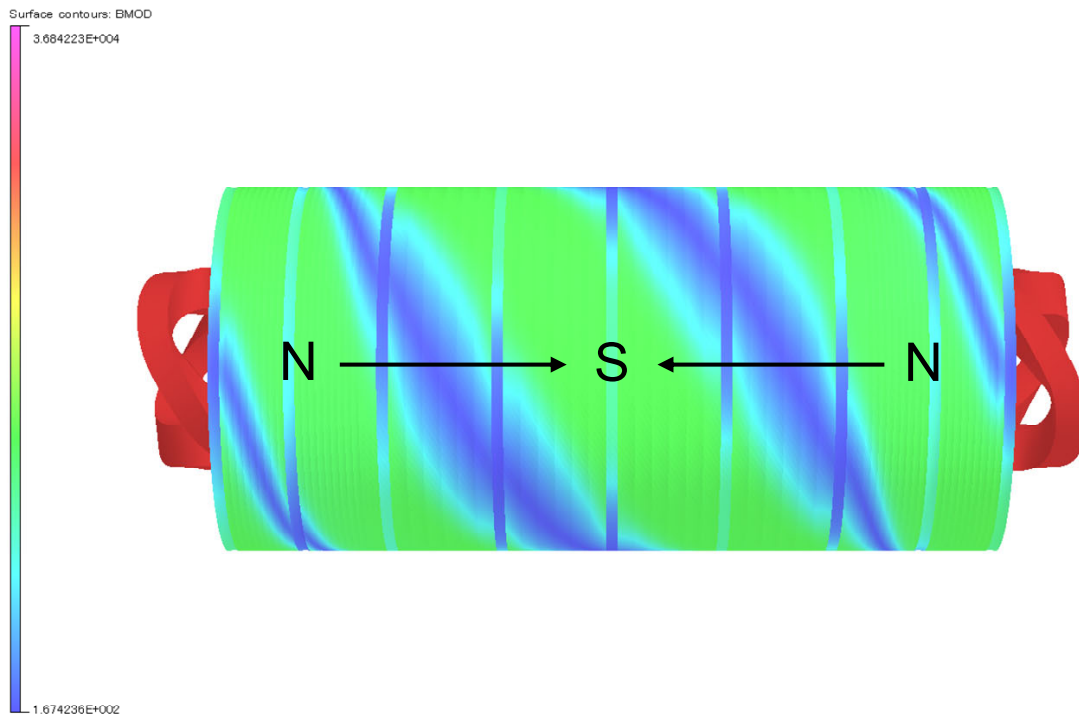


図 4-3-21 : 鉄芯内の磁場

この製作誤差を考慮した磁場計算結果と次章で述べる磁場測定結果を比較することで、より正確な磁場の補正を行い、AGS 加速器内のビーム軌道に対する影響を減らすことができる。磁場の補正方法として以下の二つの方法が考えられる。

- A. 運転電流を調整する
- B. 電磁石両端のポールピースに鉄製ブロック（シム）を取り付けることで有効磁場の長さを調整する

図 4-3-22 に運転電流を調整場合の磁場計算結果を示す。

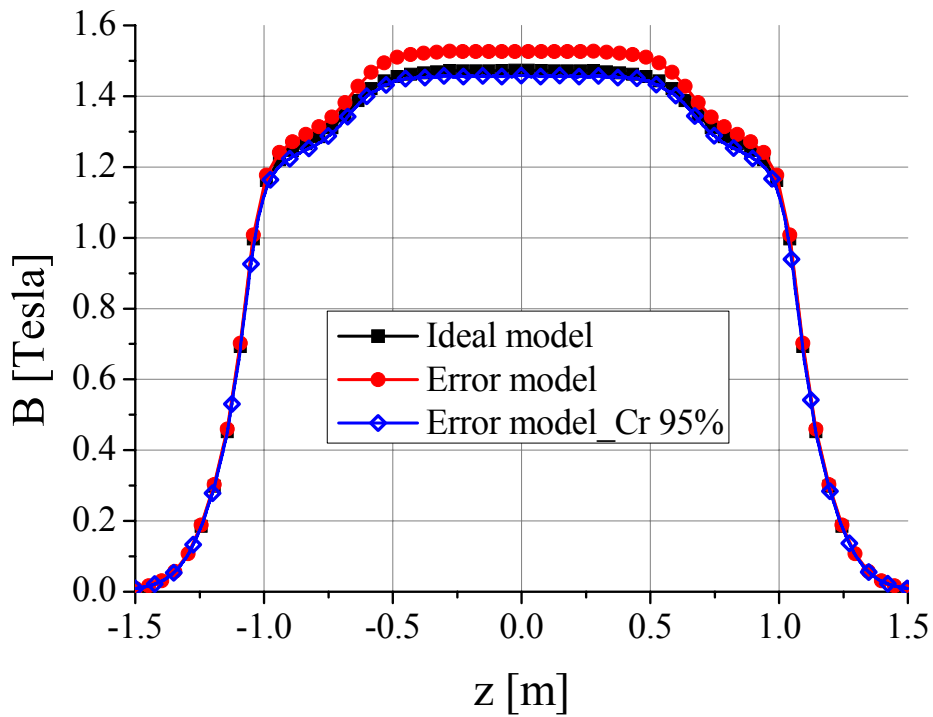


図 4-3-22 : 磁場強度分布の運転電流依存性

このように製作誤差を含む磁場計算モデルの運転電流を 2670A の 95%、すなわち 2537A で計算した結果、理想的な磁場分布に近づいた。図 4-3-21 は補正方法 B で用いるシムの写真である。

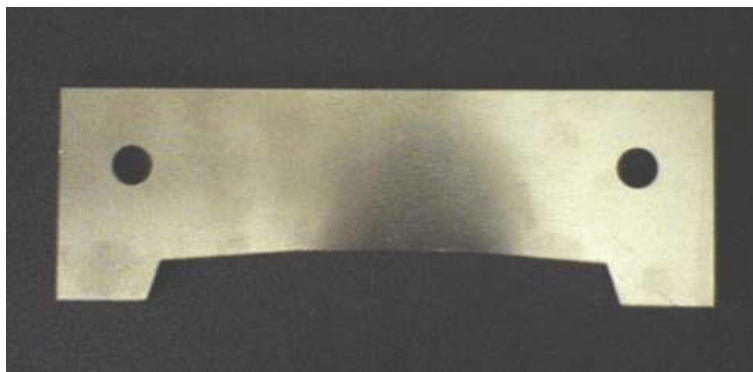


図 4-3-23 : 磁場微調整用シム

このシムの厚さを変えることによって、電磁石両端部分の磁場を調整することができる。

図 4-3-24 はシムを取り付けない場合と 30mm 厚さのシムを取り付けた場合を比較した計算結果のグラフである。

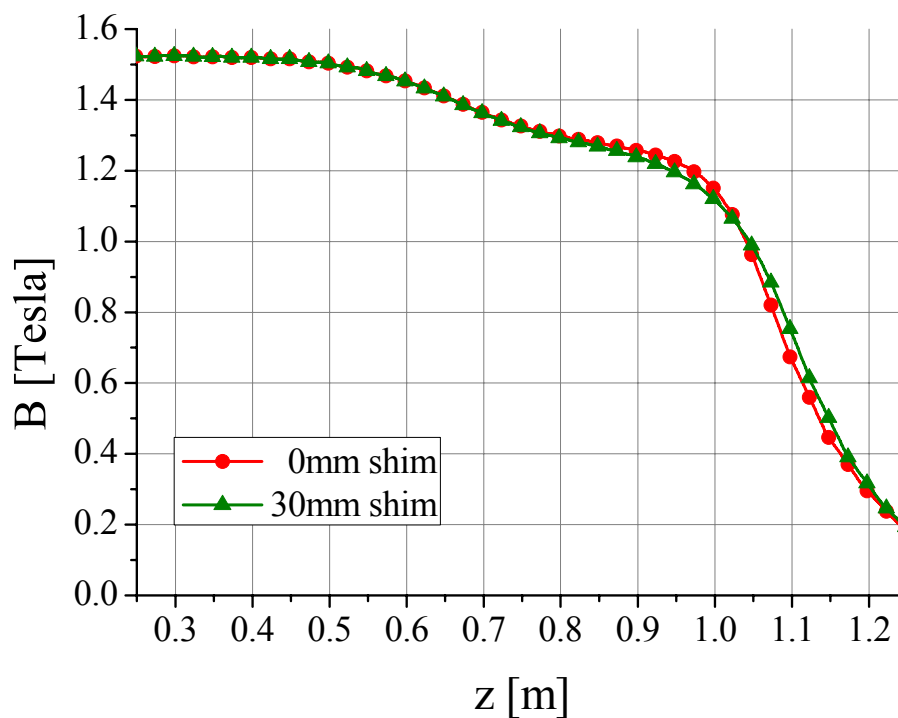


図 4-3-24 : シムによる磁場の変化

次章の磁場測定において、上記の計算結果と測定結果の比較を行い、最適な運転電流とシムの厚さを決定する。

## 参考文献

- [4-1] J. Takano, *et al.*, “Design Study of a Normal Conducting Helical Snake for AGS”,  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No.2, 457-460 (2004)
- [4-2] J. Takano, *et al.*, “Helical Dipole Partial Siberian Snake for the AGS”,  
Journal of Instrumentation, 1, P11002 (2006)
- [4-3] H. Huang, *et al.*, “Preservation of Proton Polarization by a Partial Siberian Snake”,  
Phys. Rev. Lett. 73, 2982 (1994)
- [4-4] H. Huang, Ph. D. thesis, “Preservation of Polarization of Proton Beam in the AGS with a  
Partial Siberian Snake”, Indiana University (1995)
- [4-5] V. H. Ranjbar, *et al.*, “Spin coupling resonance and suppression in the AGS”, Phys. Rev.  
Special Topics – Accl. and Beams, 7, 051001 (2004)
- [4-6] V. H. Ranjbar, Ph. D. thesis, “Increasing Proton Polarization in AGS and RHIC”,  
Univ. of Indiana (2002)
- [4-7] T. Roser, *et al.*, “Acceleration of Polarized Beams Using Multiple Strong Partial Siberian  
Snakes, Proc. of SPIN2004, Trieste, Oct. 10-16, 2004, F. Bradamante, *et al.*, eds. (World  
Scientific) p. 687
- [4-8] Catalogue of HITACHI Hollow Conductor, HITACHI Cable LTD. Tokyo, Japan
- [4-9] “コイルの製造方法及び M 型電磁石”, 特願 2003-358453
- [4-10] Nippon Steel Corp., Tokyo, Japan
- [4-11] Los Alamos Accelerator Code Group, Los Alamos National Laboratory, NM, USA  
<http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/>
- [4-12] D. Meeker, “Finite Element Method Magnetics”, <http://femm.berlios.de/>
- [4-13] Vector Fields Inc., Oxford, UK, <http://www.vectorfields.com/>
- [4-14] Computer Simulation Technology, MA, USA, <http://www.cst.com/>
- [4-15] European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble Cedex, France,  
<http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>
- [4-16] ANSYS, Inc., PA, USA, <http://www.ansys.com/>
- [4-17] A. Jain, “Harmonic Coils”, Proc. CERN Accelerator School on Measurement and  
Alignment of Accelerator and Detector Magnets, April 11-17, 1997, Anacapri, Italy,  
CERN yellow report 98-05, p. 175. <http://cas.web.cern.ch/cas/>

## 第5章 ヘリカルダイポール内の磁場測定

### 目次

5-1	磁場測定の方法	p.89
5-1-1	ホール素子法	p.89
5-1-2	核磁気共鳴法	p.91
5-1-3	ハーモニックコイル法	p.92
5-2	Warm Snake の磁場測定	p.97
5-2-1	積分磁場測定	p.97
5-2-2	磁場分布測定	p.98
5-2-3	磁場方向測定	p.101
5-2-4	多極磁場成分解析	p.104
	参考文献	p.109

## 第5章 ヘリカルダイポール内の磁場測定

本章ではまず一般的な磁場測定の方法を紹介し、BNLで行ったハーモニックコイル法を用いたヘリカルダイポール内の磁場測定結果を示す。この測定結果を第4章で行った三次元磁場計算結果と比較し、考察を行う。

### 5-1 磁場測定の方法

磁場測定は一般的にホール素子法[5-1, 5-2]、核磁気共鳴法[5-3]およびハーモニックコイル法[5-4, 5-5, 5-6]の3つの方法が用いられている。以下にそれぞれの方法について述べる。

#### 5-1-1 ホール素子法

ホール素子とはホール効果を利用し磁場と電場を変換する素子である。図5-1-1にホール素子の構造を示す。

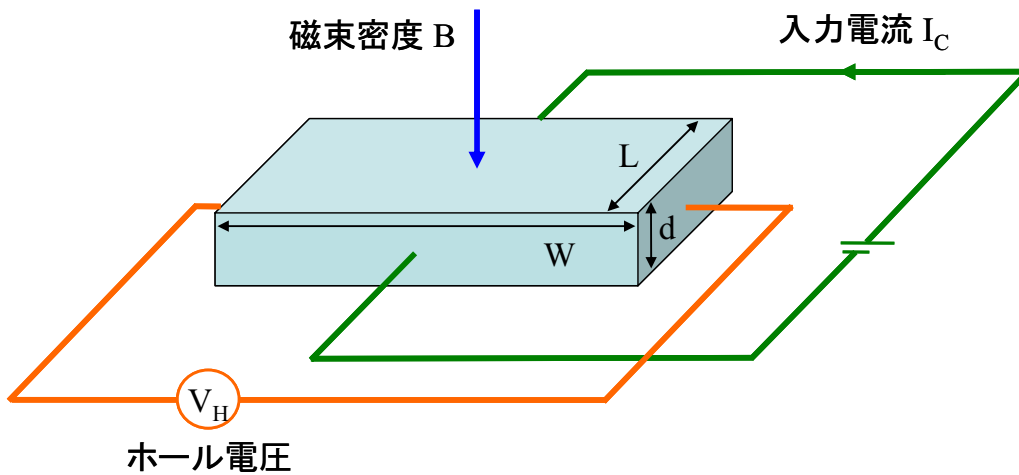


図 5-1-1 : ホール素子の構造

このように電流に対して垂直な磁場をかけたとき、電流および磁場に垂直な方向に起電力が生じる。

$$V_H = \frac{R_H}{d} \times I_C \times B \quad (5-1-1)$$

ここで、 $R_H$  はホール係数である。この電圧を測定することで磁場強度を求めることができる。ホール素子の材料はシリコン(Si)、ゲルマニウム(Ge)、ガリウム・ヒ素(GaAs)、インジウム・ヒ素(InAs)、インジウム・アンチモン(InSb)が用いられる。このうちよく使われる材料はガリウム・ヒ素とインジウム・アンチモンである。ガリウム・ヒ素は磁場に対する感度がインジウム・アンチモンに比べて低いものの温度による影響は少ない。インジウム・アンチモンは磁場に対して感度が高いが温度による影響が大きい。したがって、インジウム・アンチモンをホール素子として用いる場合、素子の温度が一定になるように温度を制御するか、磁場測定と同時に温度も測定し補正を行う必要がある。ホール素子は小さく軽量なため、磁極間の磁場分布測定に用いられることが多い。図 5-1-2 はホール素子を用いた三軸駆動型自動磁場測定装置の構成図である。

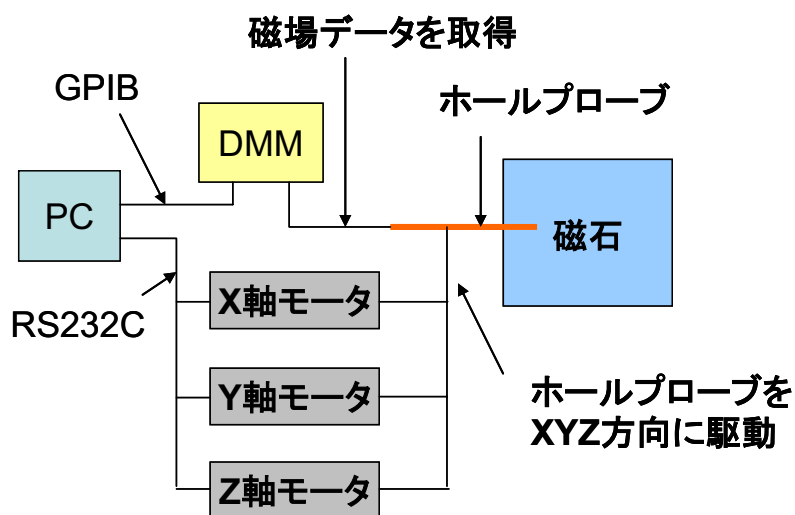


図 5-1-2 : 三軸駆動型自動磁場測定装置の構成図

このように XYZ 軸のモーターを PC で制御し、電磁石内でホール素子の位置を移動させながらホール電圧を PC に取り込むことで磁場分布の測定データを得ることができる。図 5-1-3 は実際に双極電磁石を測定した結果のグラフである。

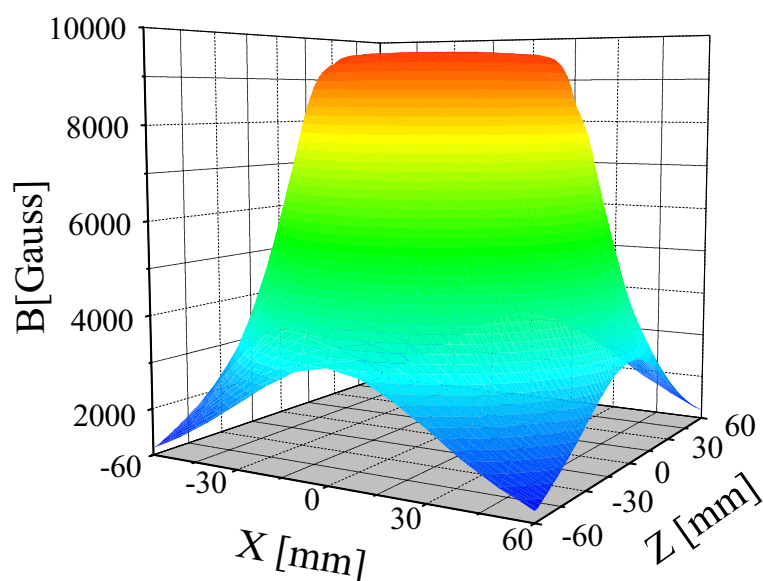


図 5-1-3 : 双極電磁石内の磁場分布測定結果

ホール素子は温度変化による測定誤差が大きいため、磁極中心において次に説明する核磁気共鳴法を用いた絶対磁場強度の測定を行い、その測定結果を元にホール素子による磁場測定結果を規格化することでより正確な磁場分布の測定結果を得ることができる。

### 5-1-2 核磁気共鳴法

核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance、NMR) は磁場の絶対値を測定するために用いられる。これは静磁場内において原子核の磁気モーメントが固有の周波数の電磁波と相互作用することを利用した測定方法である。NMR に用いられる核種は陽子または中性子の数が奇数の原子核であり、核スピン量子数  $I$  と磁気双極子モーメントを持つ。この原子核に外部から静磁場をかけたとき磁気双極子モーメントは静磁場のベクトルの周りを一定周期で歳差運動する。この歳差運動の周波数をラーモア周波数  $\nu_0$  と呼び、式(5-2)のように表される。

$$\nu_0 = \frac{\gamma}{2\pi} \times B \quad (5-1-2)$$

ここで、 $\gamma$ は Gyromagnetic ratio (回転磁比)、 $B$ は静磁場強度である。このラーモア周波数と同じ周波数の回転磁場を原子核にかけることで原子核と静磁場の間で共鳴現象が起こる。この共鳴周波数を測定することで静磁場強度の絶対値を求める磁場測定の方法が核磁気共鳴法である。表 5-1-1 に外部静磁場が 1T のときの代表的な NMR 核種の特性を示す。

表 5-1-1 : B=1T の場合の代表的な NMR 核種の特性

核種	共鳴周波数 [MHz]	天然存在比 [%]	相対強度
$^1\text{H}$	42.6	99.98	1
$^2\text{H}$	6.5	0.016	0.0096
$^{13}\text{C}$	10.7	1.108	0.016
$^{19}\text{F}$	40.1	100	0.834
$^{23}\text{Na}$	11.3	100	0.093
$^{31}\text{P}$	17.2	100	0.066
$^{14}\text{N}$	3.1	99.63	0.001

ここで、相対強度は一定磁場中の同数の核に対しての感度である。

核磁気共鳴法は加速器運転では主にビーム偏向電磁石内に固定し、電磁石制御のフィードバックに用いられる。図 5-1-2 はホール素子プローブと NMR プローブの写真である。



図 5-1-2 : ホール素子プローブと NMR プローブ

### 5-1-3 ハーモニックコイル法

ハーモニックコイルは多極磁場成分を測定するために用いられる。ハーモニックコイルには主に Tangential Coil と Radial Coil の 2 種類がある。図 5-1-2 および図 5-1-3 に Tangential Coil と Radial Coil の図を示す。

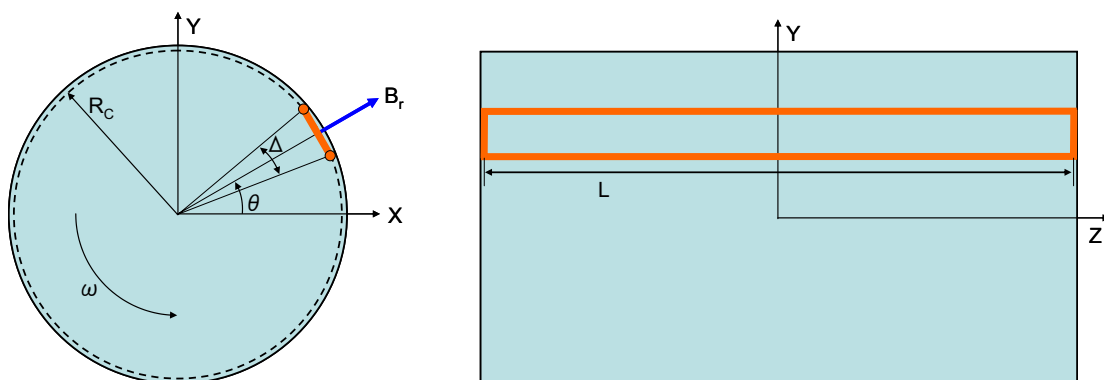


図 5-1-2 : Tangential Coil

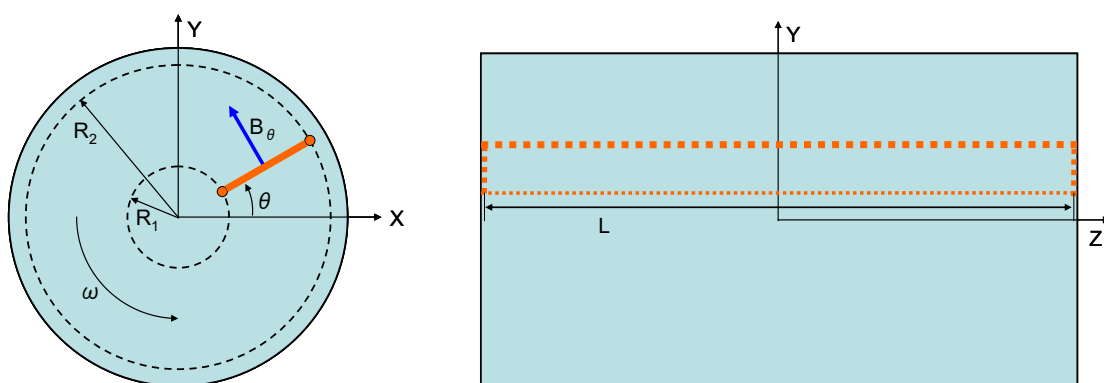


図 5-1-3 : Radial Coil

それぞれのハーモニックコイルは上図のように円筒形のプローブに固定されている。静磁場中にてこのプローブを一定角速度 $\omega$ で回転させることでハーモニックコイルに囲まれた領域の磁束の変化による誘導電圧が生じる。**Tangential Coil**は半径方向の磁場 $B_R$ 、**Radial Coil**は角度方向の磁場 $B_\theta$ による誘導電圧を測定することができる。ここで、 $B_R$ および $B_\theta$ は以下のように表される。

$$B_r(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} [B_n \sin(n\theta) + A_n \cos(n\theta)] \left( \frac{r}{R_{ref}} \right)^{n-1} \quad (5-1-3)$$

$$B_\theta(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} [B_n \cos(n\theta) - A_n \sin(n\theta)] \left( \frac{r}{R_{ref}} \right)^{n-1} \quad (5-1-4)$$

ここで、 $R_{ref}$  は任意の基準半径であり、一般的には磁極間隙の 50%~70%程度で基準半径を設定する。また  $B_n$  は  $2n$  極のノーマル磁場成分、 $A_n$  は  $2n$  極のスキュー磁場成分 ( $n=1, 2, 3\dots$ ) であり、 $n$  はハーモニック数である。磁場の水平成分  $B_x$  および垂直成分  $B_y$  は

$$B_y + iB_x = \sum_{n=1}^{\infty} [B_n + iA_n] \left( \frac{x + iy}{R_{ref}} \right)^{n-1} \quad (5-1-5)$$

と表される。

次に Tangential Coil および Radial Coil のそれぞれの場合におけるハーモニックコイルを用いた磁場解析について述べる。

ある時点において Tangential Coil 内を通る全磁束は

$$\begin{aligned} \Phi_{tan}(t) &= NL \int_{\theta-\frac{\Delta}{2}}^{\theta+\frac{\Delta}{2}} B_r(R_c, \theta) R_c d\theta \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2NLR_{ref}}{n} \left( \frac{R_c}{R_{ref}} \right)^n \sin\left(\frac{n\Delta}{2}\right) \times [B_n \sin(n\omega t + n\delta) + A_n \cos(n\omega t + n\delta)] \quad (5-1-6) \end{aligned}$$

である。ここで  $N$  はハーモニックコイルの巻数、 $\delta$  は  $t=0$  のときの角度である。この磁束の時間変化率から Tangential Coil にかかる誘導電圧は

$$\begin{aligned} V_{tan}(t) &= - \left( \frac{d\Phi_{tan}(t)}{dt} \right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} 2NLR_{ref} \omega \left( \frac{R_c}{R_{ref}} \right)^n \sin\left(\frac{n\Delta}{2}\right) \times [A_n \sin(n\omega t + n\delta) - B_n \cos(n\omega t + n\delta)] \quad (5-1-7) \end{aligned}$$

となる。

同様にして Radial Coil の場合、全磁束は

$$\begin{aligned} \Phi_{rad}(t) &= NL \int_{R_1}^{R_2} B_\theta(r, \theta) dr \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{NLR_{ref}}{n} \left[ \left( \frac{R_2}{R_{ref}} \right)^n - \left( \frac{R_1}{R_{ref}} \right)^n \right] \times [B_n \cos(n\omega t + n\delta) - A_n \sin(n\omega t + n\delta)] \quad (5-1-8) \end{aligned}$$

となり、この磁束の時間変化率から Radial Coil にかかる誘導電圧は

$$V_{rad}(t) = -\left(\frac{d\Phi_{rad}(t)}{dt}\right) \\ = \sum_{n=1}^{\infty} NLR_{ref}\omega \left[ \left(\frac{R_2}{R_{ref}}\right)^n - \left(\frac{R_1}{R_{ref}}\right)^n \right] \times [B_n \sin(n\omega t + n\delta) + A_n \cos(n\omega t + n\delta)] \quad (5-1-9)$$

となる。以上のようにハーモニックコイルから得られた誘導電圧を高速フーリエ変換 (FFT) し、多極磁場成分を求めることができる。

次にハーモニックコイルを用いた積分磁場の測定について説明する。測定する電磁石に対して Z 方向に十分長い Radial Coil を用いるとき、誘導電圧の積分は式(5-1-10)のように求めることができる。

$$\int_0^{\theta} V_{rad}(t)dt = \Phi_{rad}(0) - \Phi_{rad}(\theta) \\ = \Phi_{rad}(0) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{NLR_{ref}}{n} \left[ \left(\frac{R_2}{R_{ref}}\right)^n - \left(\frac{R_1}{R_{ref}}\right)^n \right] \times [B_n \cos(n\theta + n\delta) - A_n \sin(n\theta + n\delta)] \quad (5-1-10)$$

この他に、図 5-1-4 に示されているような Z 方向に十分長い Dipole Coil を用いて積分磁場を測定する場合がある。

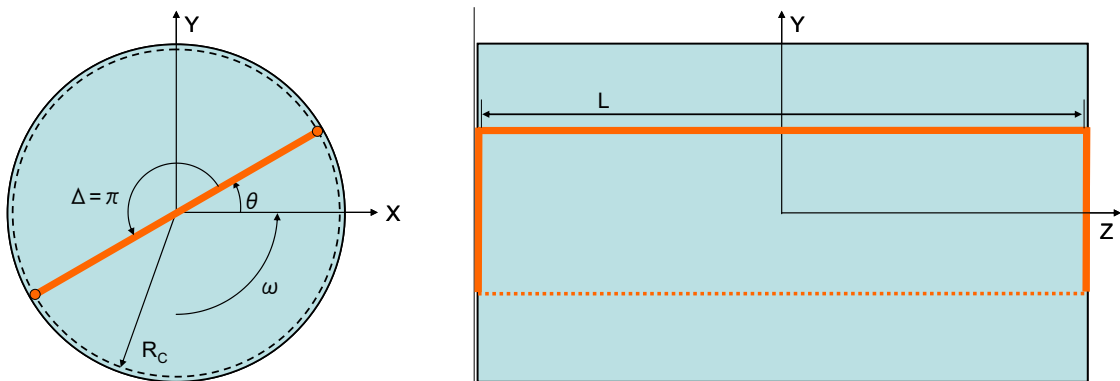


図 5-1-4 : Dipole Coil

この Dipole Coil は Tangential Coil の  $\Delta$  を  $180^\circ$  にしたものである。このハーモニックコイルではハーモニック数  $n$  が奇数、すなわち 2 極成分、6 極成分、10 極成分・・・のみ測定可能である。Dipole Coil が角度  $\theta$  のときにコイル内を通る全磁束は

$$\begin{aligned}\Phi_{Dipole}(t) &= NL \int_{\theta-\frac{\pi}{2}}^{\theta+\frac{\pi}{2}} B_r(R_c, \theta) R_c d\theta \\ &= \sum_{\substack{n=1 \\ n=odd}}^{\infty} \frac{2NLR_{ref}}{n} \left( \frac{R_c}{R_{ref}} \right)^n \times [B_n \sin(n\omega t + n\delta) + A_n \cos(n\omega t + n\delta)]\end{aligned}\quad (5-1-11)$$

と表される。したがって、Dipole Coil で測定される誘導電圧は

$$\begin{aligned}V_{Dipole}(t) &= - \left( \frac{d\Phi_{Dipole}(t)}{dt} \right) \\ &= \sum_{\substack{n=1 \\ n=odd}}^{\infty} 2NLR_{ref} \omega \left( \frac{R_c}{R_{ref}} \right)^n \times [A_n \sin(n\omega t + n\delta) - B_n \cos(n\omega t + n\delta)]\end{aligned}\quad (5-1-12)$$

と求められる。よって積分磁場は

$$\begin{aligned}\int V_{Dipole}(t) dt &= \Phi_{Dipole}(0) - \Phi_{Dipole}(\theta) \\ &= \Phi_{Dipole}(0) - \sum_{\substack{n=1 \\ n=odd}}^{\infty} \frac{2NLR_{ref}}{n} \left( \frac{R_c}{R_{ref}} \right)^n \times [B_n \cos(n\theta + n\delta) - A_n \sin(n\theta + n\delta)]\end{aligned}\quad (5-1-13)$$

となる。

以上のようにハーモニックコイルを用いて多極磁場成分および積分磁場を求めることができる。次のセクションではハーモニックコイルを用いヘリカルダイポール内の磁場強度、多極磁場成分解析、磁場の向きおよび積分磁場の測定について述べる。

## 5-2 Warm Snake の磁場測定

本セクションではハーモニックコイルを用いたヘリカルダイポール内の磁場測定について記述し、第4章で行った三次元磁場計算結果との比較を行い、製作誤差による磁場のエラーを補正する方法について説明する。本磁場測定では Long Dipole Coil と Short Tangential Coil の 2 種類のハーモニックコイルを用いた。Long Dipole Coil は全長が 3582mm であり、Warm Snake の全長より十分長い。これはヘリカルダイポール内の積分磁場を測定するために使用する。Short Tangential Coil は全長が 50.9mm であり、ヘリカルダイポール内の磁場強度分布を測定し、多極磁場成分の解析に用いた。また螺旋磁場方向の測定にも使用した。以下にこれらの測定結果と考察を述べる。

### 5-2-1 積分磁場測定

偏極陽子ビームが Warm Snake 内を通った際、加速器のビーム軌道への影響を最小限に抑えるため、Warm Snake 出口においてビーム位置のオフセットおよび出射角度がゼロになるように第4章で三次元磁場計算およびビーム軌道計算を行い、ヘリカルダイポール内の磁場を最適化した。実機の Warm Snake がこの条件を満たしていることを確認するためには水平方向および垂直方向の積分磁場を測定する必要がある。式(5-2-1)から(5-2-4)は積分磁場と出射角度および位置オフセットの関係式である。

$$\theta_x = \int B_y ds = 0 \quad (5-2-1)$$

$$\theta_y = \int B_x ds = 0 \quad (5-2-2)$$

$$\Delta_x = \int \theta_x ds = 0 \quad (5-2-3)$$

$$\Delta_y = \int \theta_y ds = 0 \quad (5-2-4)$$

ここで  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  は水平・垂直方向の出射角度、 $\Delta_x$ 、 $\Delta_y$  は水平・垂直方向の位置オフセットである。これらの式から、水平および垂直方向の積分磁場がゼロであれば、出射角度および位置オフセットをゼロにすることが可能であることがわかる。今回の測定では運転電流を変えながら積分磁場の測定を行った。また、積分磁場を補正するため電磁

石両端のポールに取り付ける鉄製のシムの厚さを変えた磁場測定も行った。図 5-2-1 は Long Dipole Coil を用いたヘリカルダイポール内の積分磁場の測定結果である。

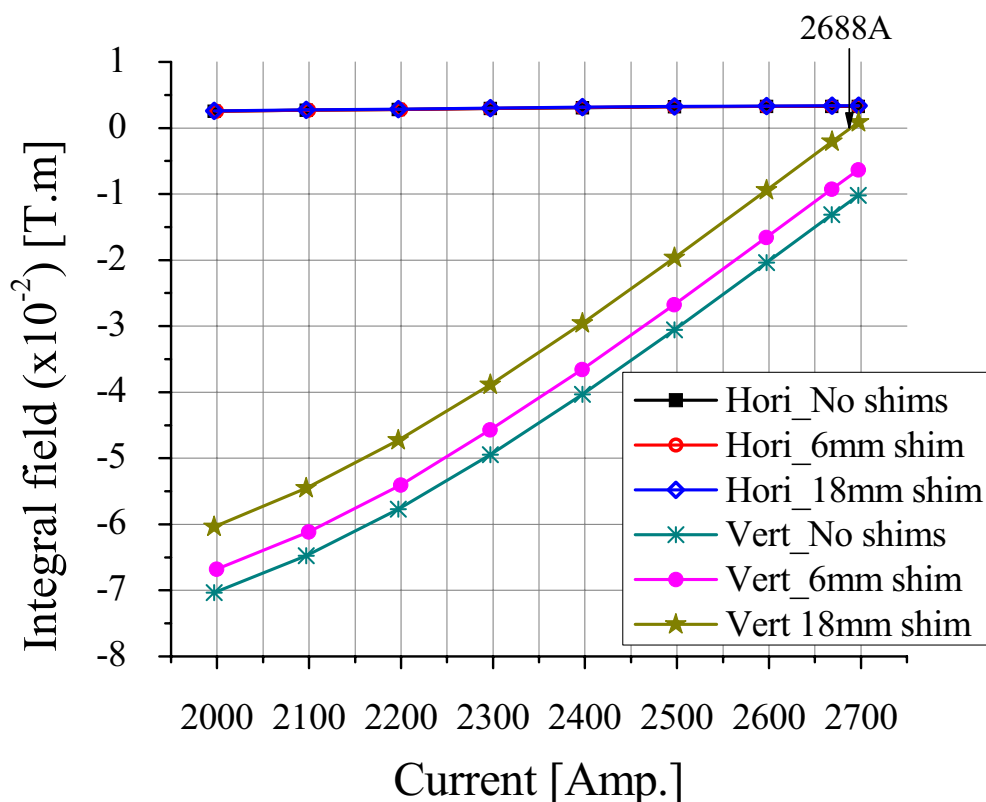


図 5-2-1：積分磁場の測定結果

この測定結果より、水平方向の積分磁場は運転電流に依存せずほぼ一定であり、約  $0.3 \times 10^{-2} \text{T.m}$  と非常に小さい値であった。また、シムの厚さによる変化も無かった。これに対し、垂直方向の積分磁場は運転電流依存性が比較的大きく測定された。また、シムの厚さによる効果も見られた。この測定結果より、厚さ 18mm のシムを取り付けたまま電流 2688A で Warm Snake を運転することで水平・垂直方向の積分磁場を最小化できることがわかる。

## 5-2-2 磁場分布測定

ヘリカルダイポール内のビーム進行方向に対する磁場分布は Short Tangential Coil を

用いて行った。図 5-2-2 に Short Tangential Coil の写真を示す。

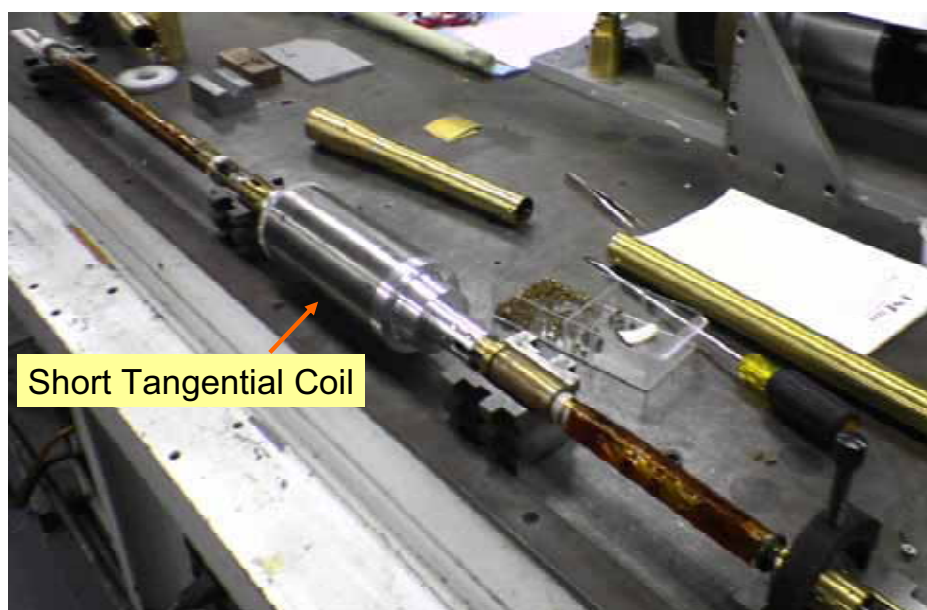


図 5-2-2 : Short Tangential Coil

磁場分布の運転電流依存性を調べるため、磁場測定は 2668A、2537A、2404A で行った。これは第 4 章で説明した設計運転電流の 100%、95%、90%に相当する。図 5-2-3 は磁場測定結果と三次元磁場計算結果の比較である。

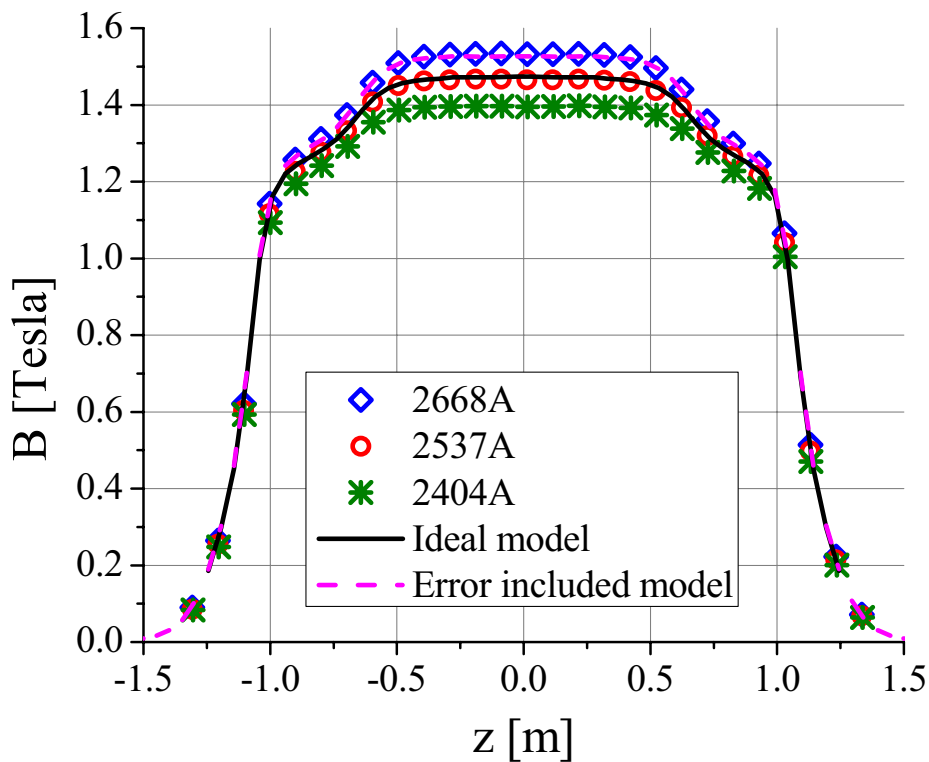


図 5-2-3 : ヘリカルダイポール内の磁場分布

図 5-2-3 に示されているように、2668A の磁場測定結果は三次元磁場計算で得られた理想的な磁場よりも強い磁場を生じており、第 4 章で行った製作誤差を考慮した磁場計算結果に近い結果となった。また、運転電流の 95% に相当する 2537A の測定結果が理想的な磁場にもっとも近い結果であった。これは製作誤差の評価および誤差を考慮した三次元磁場計算モデルが正確であったことを意味する。

次に、Slow pitch 領域と Rapid pitch 領域それぞれの中央における磁場強度の運転電流依存性を測定した。図 5-2-4 に測定結果のプロットを示す。

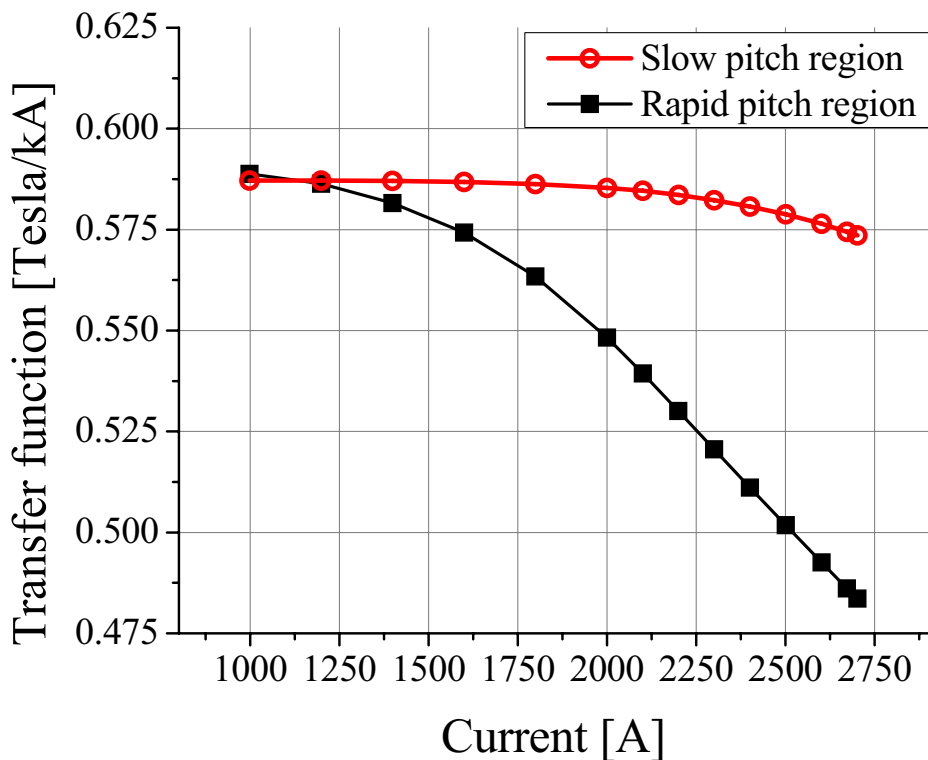


図 5-2-4：磁場強度の運転電流依存性

この測定結果より、運転電流が低い場合、それぞれの領域における磁場強度はほぼ等しい。ところが、運転電流を上げた場合、Rapid pitch 領域の磁場強度が電流に比例して強くならず、Slow pitch 領域との磁場強度の違いが生じてしまう。これは第 4 章でも述べたようにヘリカルコイルの断面形状によるそれぞれの領域の鉄芯体積の違いによって磁場飽和に差異が生じるためである。この Rapid pitch 領域の早い磁場飽和によって、図 5-2-3 の測定結果のように Rapid pitch 領域の磁場が Slow pitch 領域より低くなることが理解できる。

### 5-2-3 磁場方向測定

前セクションでは Short Tangential Coil を用いて磁場強度の分布の測定を行ったが、この測定は同時に磁場の向きの情報も含んでいる。図 5-2-5 はヘリカルダイポール内の磁場の向きの測定結果と計算結果の比較である。

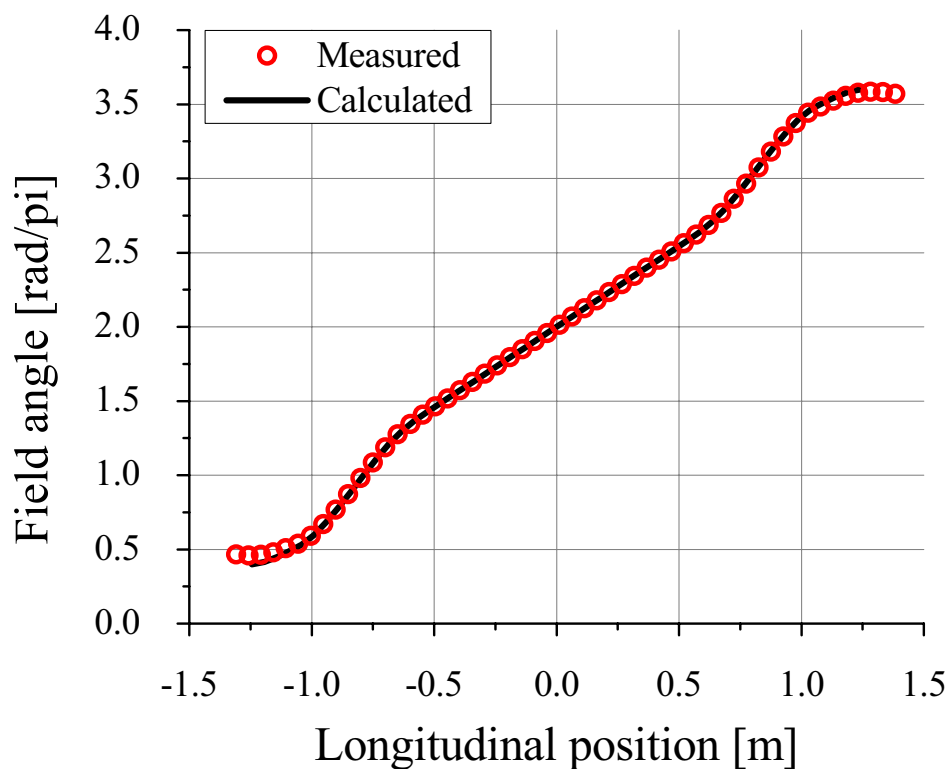


図 5-2-5 : ヘリカルダイポール内の磁場の向き

鉄芯領域における磁場の向きの測定結果は計算結果と非常に良く一致している。しかしながら、ヘリカルコイルの折り返し付近では誤差があることがわかる。これは鉄芯外の領域においてヘリカルコイルを固定する構造が無い場合、ヘリカルコイルのねじれが緩んだことが原因のひとつと考えられる。磁場の向きの誤差は-1.2m においては 15.1%、+1.2m では 0.78%である。この両端における磁場方向の左右バランスの悪さはヘリカルコイルの端子によるものと考えられる。図 5-2-6 にヘリカルコイルの端子の写真を示す。

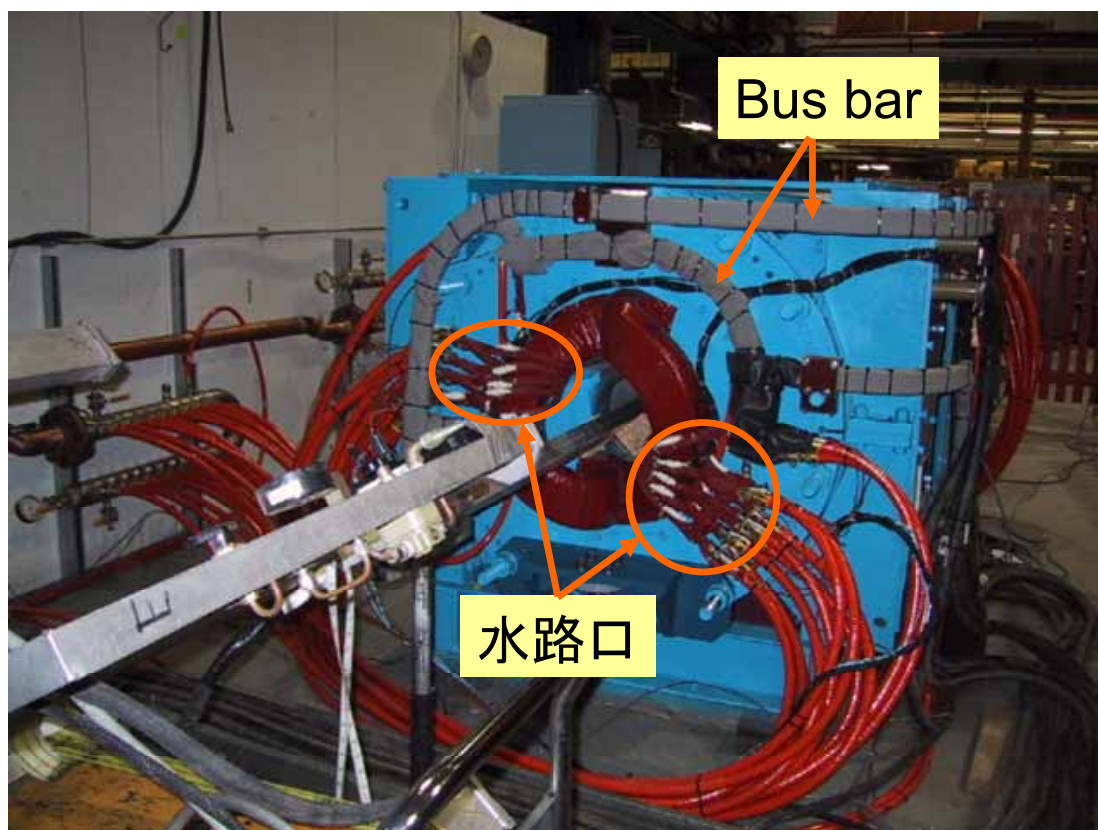


図 5-2-6 : Warm Snake の Bus bar と水路口

このように、ヘリカルコイルの電氣的端子から Warm Snake 側板にある電源ケーブルとの接続端子台まで Bus bar と呼ばれる太い銅の棒で接続されている。この Bus bar は図 5-2-6 で示されている側にのみある。したがって、図 5-2-5 の両端部分の左右バランスの悪さの原因のひとつはこの Bus bar による磁場の乱れによるものと考えられる。また、磁場方向の誤差のもうひとつの原因としては水路口が挙げられる。これはヘリカルコイルの両端に同じ数だけある。したがって、この水路口は磁場の向きの左右バランスの悪さの原因ではないが、両端領域の計算結果との測定結果の違いの原因であると考えられる。この両端領域における磁場の向きの誤差は、特に-1.2m 付近の誤差の割合が高いものの、図 5-2-3 からわかるように磁場強度が低い領域であるため、ビーム軌道に与える影響は鉄芯内の磁場と比べて非常に小さい。

## 5-2-4 多極磁場成分解析

Short Tangential Coil を用いた磁場強度分布測定の結果を元に多極磁場成分の解析を行った。解析は 2668A の測定データを用いて Dipole、Sextupole、Decapole のノーマル成分およびスキュー成分について行った。図 5-2-7 から図 5-2-12 は Dipole、Sextupole、Decapole のノーマル成分およびスキュー成分の磁場分布測定から得られた多極成分の解析結果と第 4 章で行った三次元磁場計算の解析結果を比較したグラフである。測定結果と計算結果の誤差についてまとめたものを表 5-2-1 に示す。この誤差は測定結果と計算結果の差分を Normal Dipole 成分の中心値である 10000unit を基準にして割合を求めた。比較を行った位置はヘリカルコイル両端領域である  $\pm 1.2\text{m}$ 、Rapid pitch 領域の中央部分に当たる  $\pm 0.85\text{m}$ 、および Slow pitch 領域の中央部分である  $0\text{m}$  の計 5 点である。

表 5-2-1 : 各成分の計算結果と測定結果の誤差

Longitudinal Position [m]	Dipole [%]		Sextupole [%]		Decapole [%]	
	Normal	Skew	Normal	Skew	Normal	Skew
-1.2	15.7	5.4	0.6	0.8	0.009	0.018
-0.85	2.1	1.9	0.3	0.2	0.001	0.003
0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.005	0.003
0.85	1.2	2.4	0.3	0.2	0.002	0.020
1.2	6.6	4.0	0.6	0.8	0.003	0.001

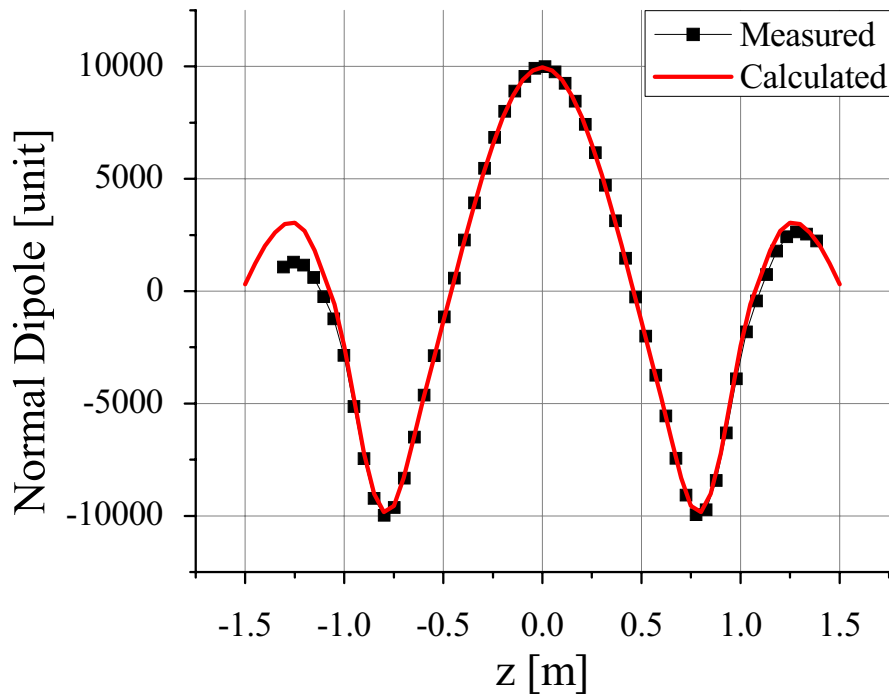


図 5-2-7 : Normal Dipole 成分

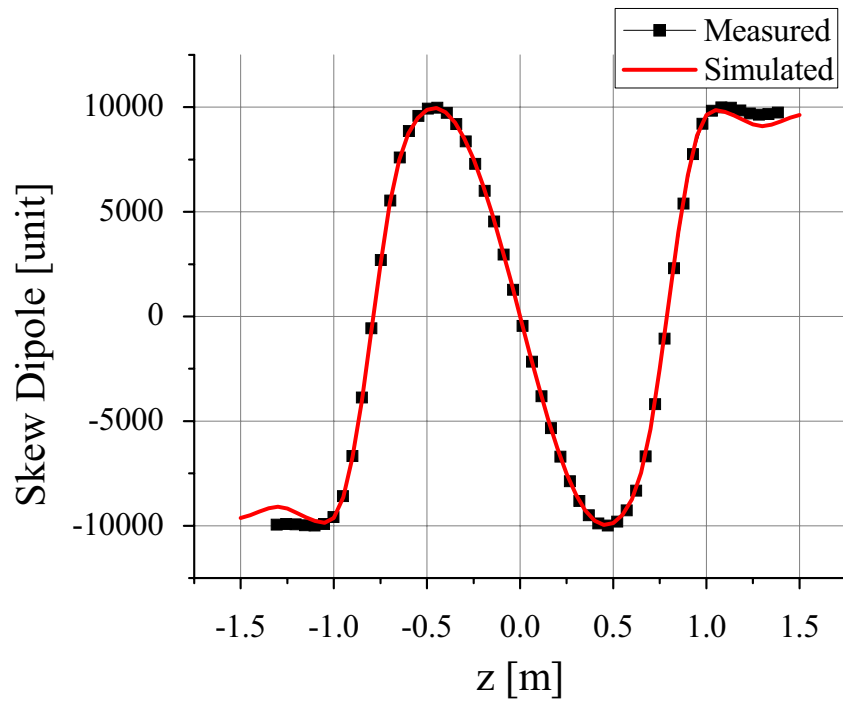


図 5-2-8 : Skew Dipole 成分

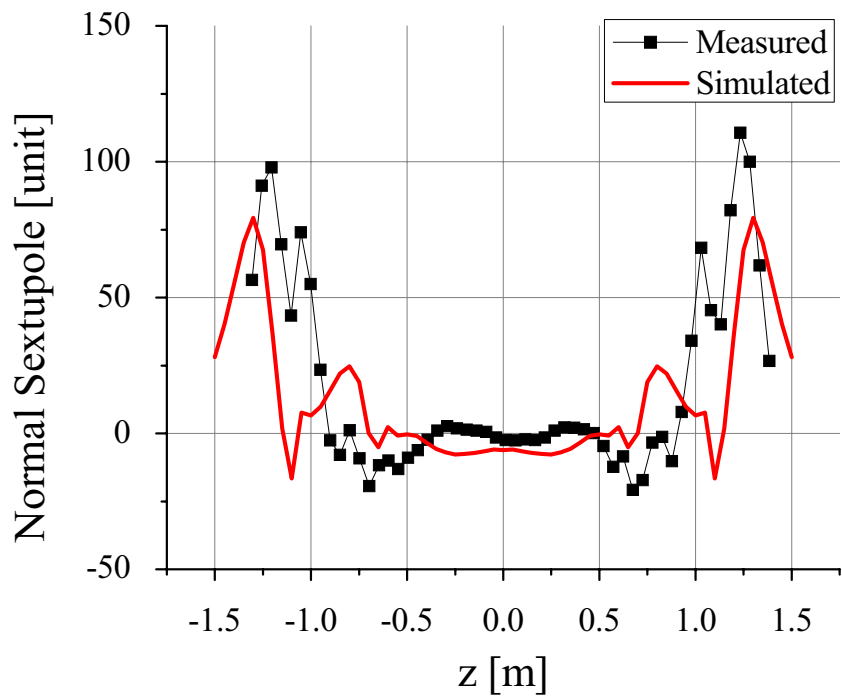


図 5-2-9 : Normal Sextupole 成分

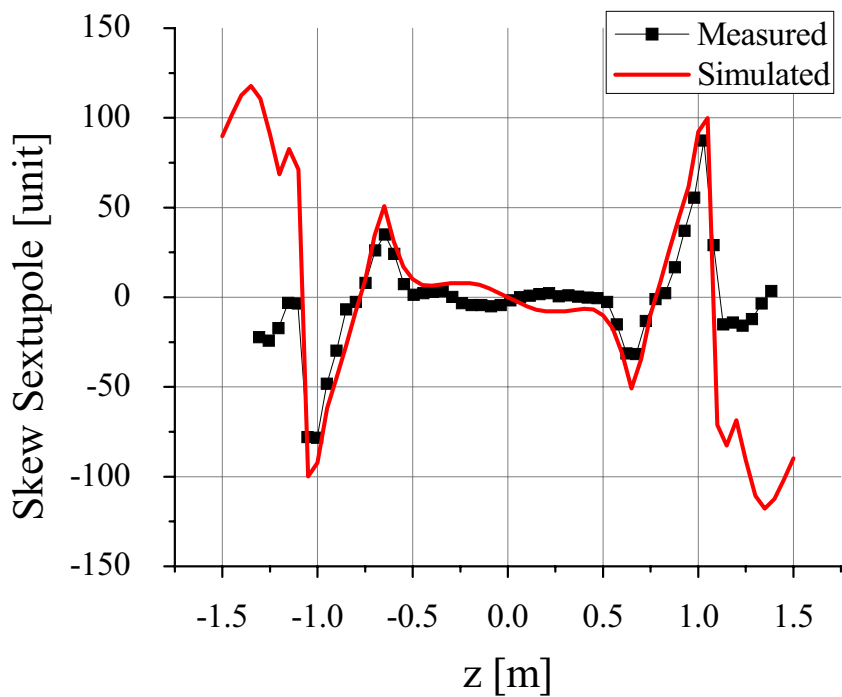


図 5-2-10 : Skew Sextupole 成分

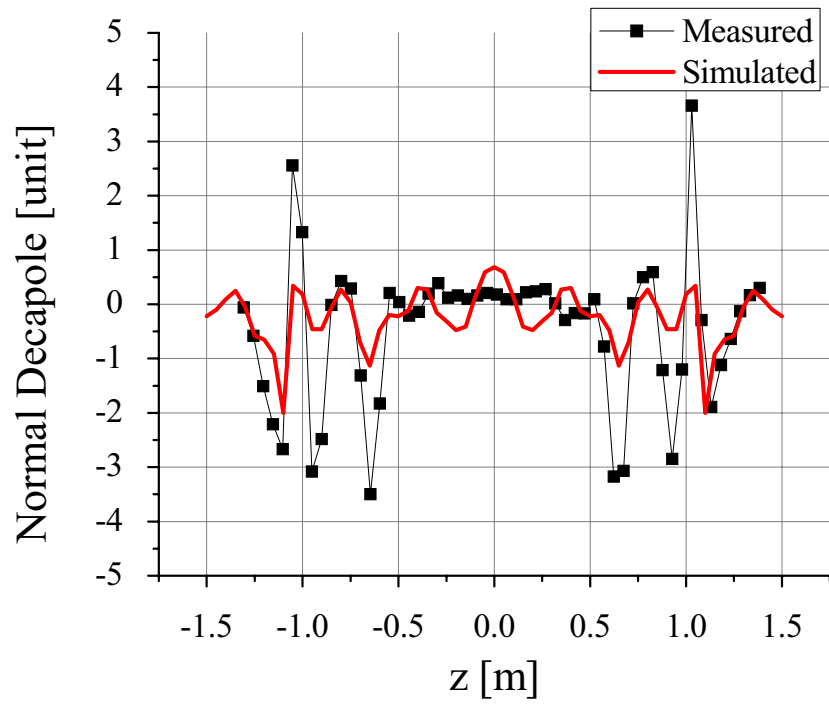


図 5-2-11 : Normal Decapole 成分

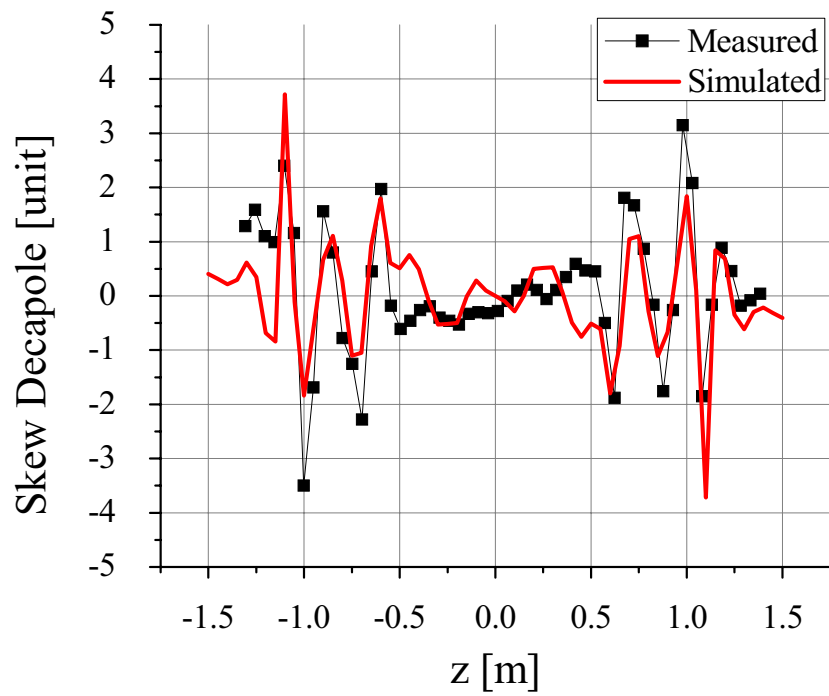


図 5-2-12 : Skew Decapole 成分

表 5-2-1 および図 5-2-7 より -1.2m における Normal Dipole 成分の誤差が大きいことがわかる。これは前セクションで述べた Bus bar による影響が大きいと考えられる。Sextupole および Decapole 成分に関しても計算結果と測定結果の誤差があるものの、鉄芯内の各成分値が小さいためビームに対する影響は小さいものと考えられる。

最終的な磁場の最適化は Warm Snake を加速器に導入し、ビームを通して行う。次章において Warm Snake を用いたビームスタディについて述べる。

## 参考文献

- [5-1] E. Kusano, *et al.*, “Performance of various Hall generators for 3-axes magnetic field measurements”,  
Proc of the 13<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology, pp.55-57 Oct. 2001
- [5-2] E. Hirose, *et al.*, “A new 3-axis magnetic field measurement system based on Hall elements”,  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No.2, 1814-1817 (2004)
- [5-3] 株式会社エコー電子 “NMR 磁場測定器の原理”,  
[http://echo-denshi.co.jp/nmr\\_gen.htm](http://echo-denshi.co.jp/nmr_gen.htm)
- [5-4] A. Jain, “Harmonic Coils”, Proc. CERN Accelerator School on Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets, April 11-17, 1997, Anacapri, Italy,  
CERN yellow report 98-05, p. 175. <http://cas.web.cern.ch/cas/>
- [5-5] 遠藤有聲 “加速器電磁石入門”, 高エネルギー加速器セミナーOHO’03 (2003)
- [5-6] 柳岡栄一, *et al.*, “J-PARC 50GeV-MR 電磁石の量産機のための磁場測定位置について” Proc. of the 14<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology, Nov. 2003

## 第6章 Siberian Snake を用いた偏極陽子の加速実験

### 目次

6-1	Warm Snake を用いた偏極陽子ビームの加速実験	p.110
6-1-1	ビーム加速の実験	p.111
6-1-2	Warm Snake のスネーク強度	p.120
6-1-3	スピンチューン	p.121
6-1-4	スピンミスマッチ	p.123
6-1-5	偏極度の測定	p.127
6-1-6	ビーム軌道の最適化	p.130
6-1-7	偏極度のビーム強度依存性	p.136
6-1-8	2005 年までの Figure of Merit の向上	p.139
6-2	2 台の Partial Siberian Snake と偏極陽子の振る舞い	p.141
6-2-1	超伝導ヘリカルダイポール型 Partial Siberian Snake	p.141
6-2-2	Double snake のスピンチューン	p.144
6-2-3	Double snake のスピンミスマッチ	p.150
6-3	2 台の Partial Siberian Snake を用いた加速器実験	p.157
6-3-1	Vertical tune scan	p.157
6-3-2	スピンミスマッチの測定	p.161
6-3-3	2005 年におけるビームランプ時の Raw asymmetry の測定	p.162
6-3-4	Double snake 運転時における 偏極度のビーム強度依存性	p.164
6-3-5	ハーモニクスの補正	p.180
6-3-6	ハーモニクス補正後の Vertical tune scan	p.186
6-3-7	1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転	p.189

6-4 第6章のまとめ

p.198

参考文献

p.201

## 第6章 Siberian Snake を用いた偏極陽子の加速実験

第4章および第5章で詳しく説明した Warm Snake は2004年にAGS加速器に導入した。2004年および2005年は Warm Snake[6-1, 6-2, 6-3, 6-4, 6-5, 6-6, 6-7]と RF dipole[6-9, 6-10, 6-11]の組み合わせ運転を行い、AGS加速器出口における偏極度は55%を達成した。[6-3, 6-4] 2005年には新たに超伝導 Helical Dipole Partial Siberian Snake (Cold Snake, CSNK) [6-12]がAGS加速器に導入された。この Cold Snake と Warm Snake を組み合わせて運転することで2006年には65%の偏極度を達成した。[6-12, 6-13] 本章ではこれらの加速器実験の結果および今後の加速器運転の案について紹介する。

### 6-1 Warm Snake を用いた偏極陽子ビームの加速実験

完成した Warm Snake は図6-1-1に示されているようにAGS加速器の直線区間E20に導入された。

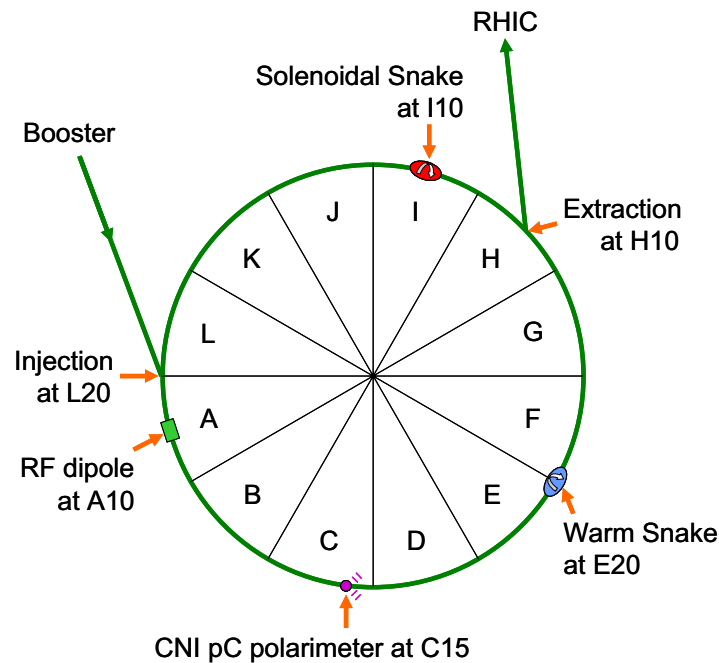


図 6-1-1 : AGS 加速器内における Warm Snake の配置

図 6-1-2 は AGS 加速器に導入した Warm Snake の写真、図 6-1-3 は Warm Snake の上流および下流付近の写真である。



図 6-1-2 : AGS 加速器に設置された Warm Snake



図 6-1-3 : Warm Snake の上流（左）および下流（右）付近の写真

### 6-1-1 ビーム加速の実験

Warm Snake 内における偏極陽子ビームの軌道は第 4 章で述べたように加速器内におけるビーム閉軌道を可能な限り乱さないようにするために電磁石の入口・出口においてビーム進行方向に対して垂直な面におけるビーム位置のオフセットおよび電磁石出口におけるビームの出射角度も持たない設計になっている。これはダブルピッチ構造によって達成することができた。しかしながら、第 5 章の磁場測定結果から分かるように、Rapid pitch 領域と Slow pitch 領域で鉄芯の磁場飽和によってヘリカルダイポール内の磁

場強度分布が運転電流依存性を持っている。したがって、設計どおりの運転電流値から大きく違う電流を Warm Snake に流した場合、AGS 加速器内のビームは消滅してしまう。実際にこのビーム軌道の Warm Snake 運転電流依存性を調べるため、Beam Position Monitor (BPM) を用いて AGS 加速器内のビーム位置の測定を行った。

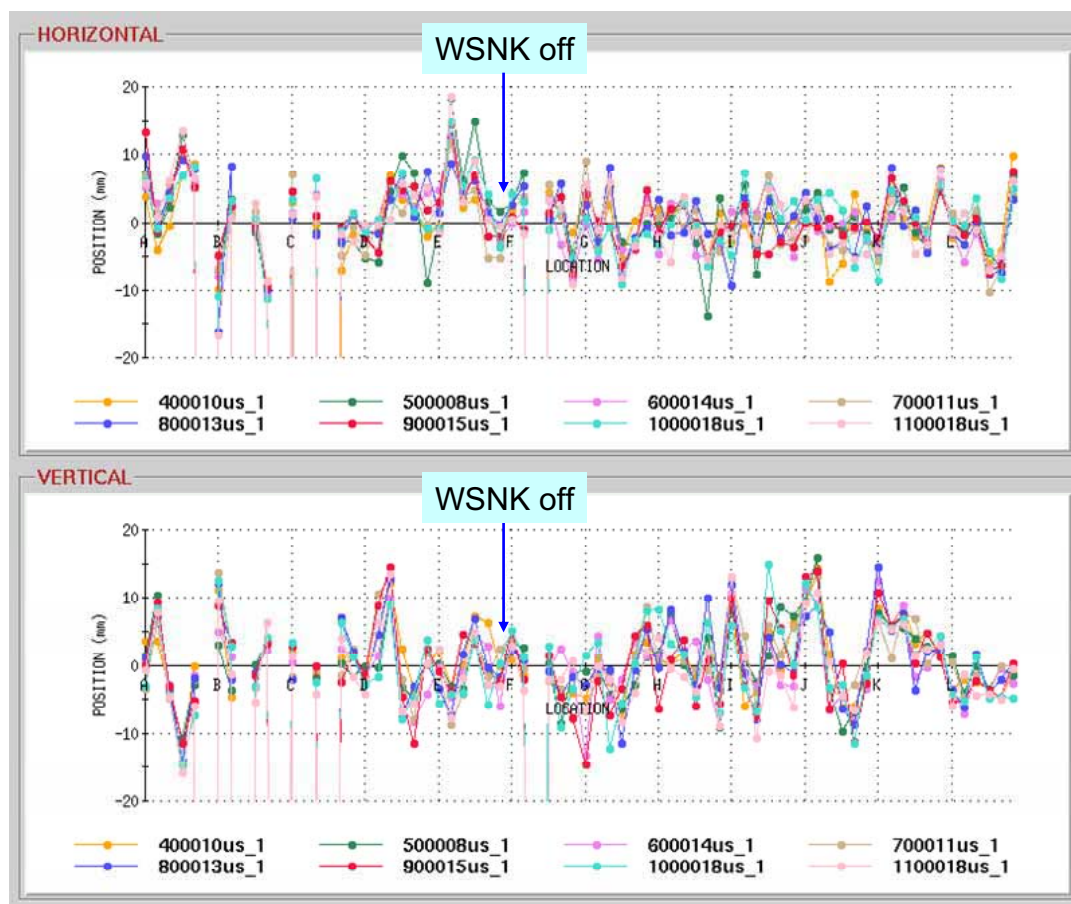


図 6-1-4 : AGS 加速器内のビーム位置 (WSNK 0A)

図 6-1-4 の横軸は AGS 加速器リングを直線表示したものである。プロットの色はビーム入射後の時間を表し、時間が遅いほどビームは加速されており、ビームエネルギーが高い。このプロットを元に Warm Snake の運転電流を 2600A および 2700A に設定し、ビーム位置の違いを比較する。図 6-1-5 は Warm Snake の運転電流を 2600A にしたときの AGS 加速器内のビーム位置の測定結果を示す。

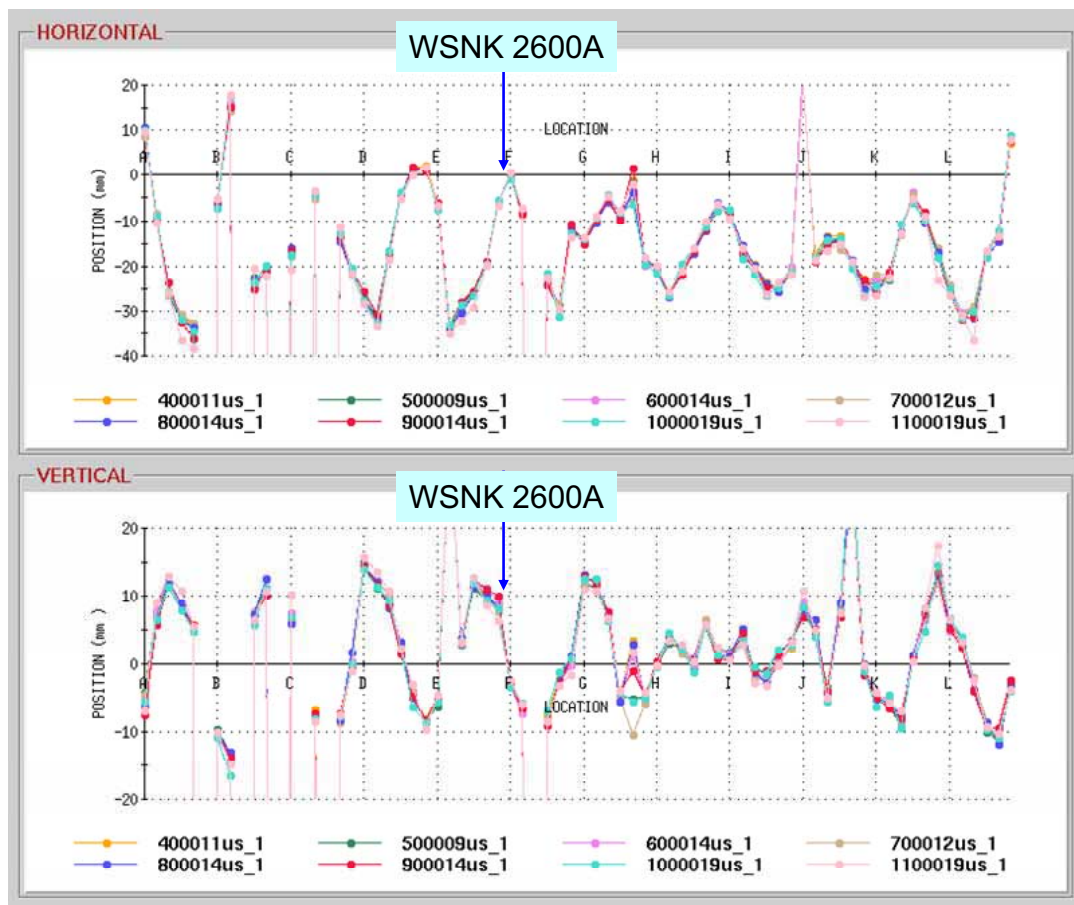


図 6-1-5 : AGS 加速器内のビーム位置 (WSNK 2600A)

Warm Snake の運転電流を 2600A にした場合、水平方向のビーム位置は Warm Snake をオフにした場合と比べて全体的にマイナス方向、すなわち AGS 加速器リングの内側にずれが生じ、振幅も大きくなった。これはビームの出射角度が加速器リングの内側方向を向いていることを意味する。また、このときの AGS 加速器内のビーム電流は非常に不安定であった。Warm Snake の運転電流を 2600A 以下にした場合、AGS 加速器内のビームは消滅してしまい、ビームカレントを観測することはできなかった。

次に Warm Snake の運転電流を 2700A にした場合のビーム位置の測定結果を示す。

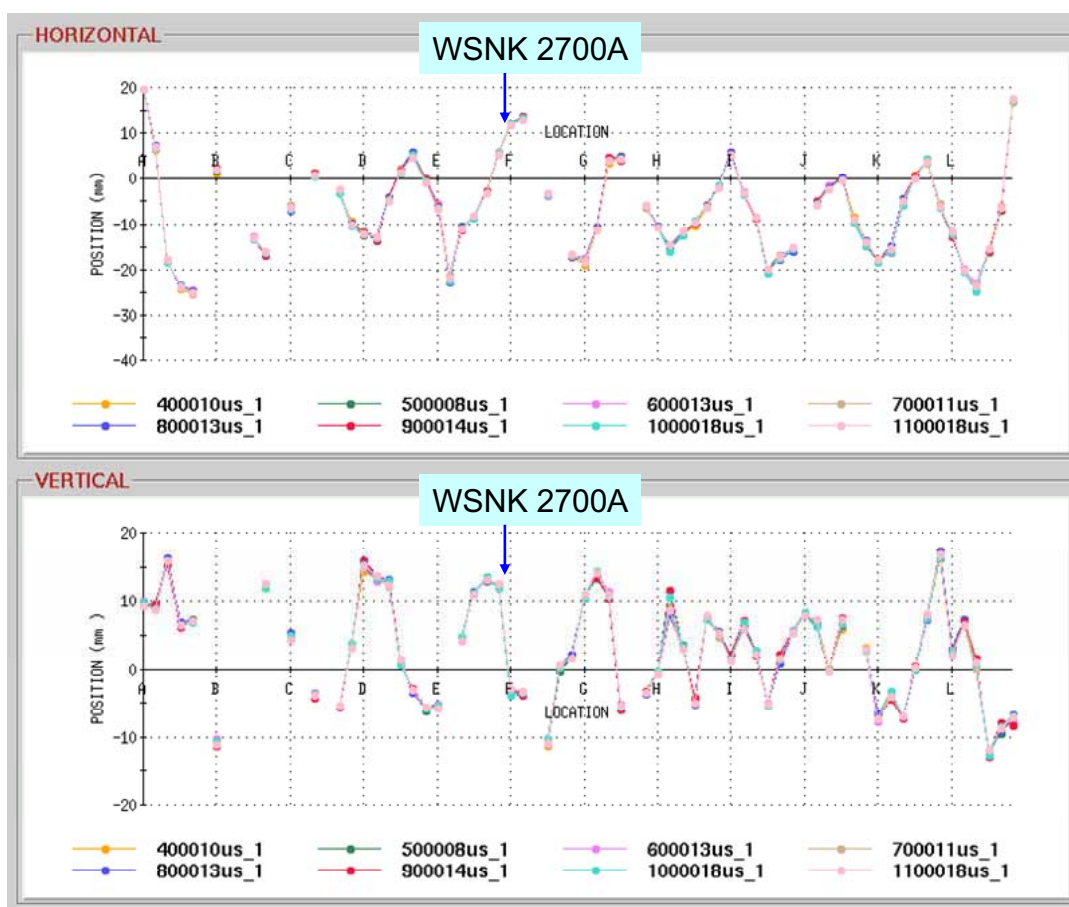


図 6-1-6 : AGS 加速器内のビーム位置 (WSNK 2700A)

この場合、2600A に比べて水平方向のビーム位置は改善されたが、垂直方向に関しては大きな変化はなかった。しかしながら、2700A で Warm Snake を運転した場合、AGS 加速器内のビーム電流は安定した。図 6-1-7 は Warm Snake の運転電流を 2600A および 2700A にした場合の AGS 加速器内のビーム電流の測定結果である。

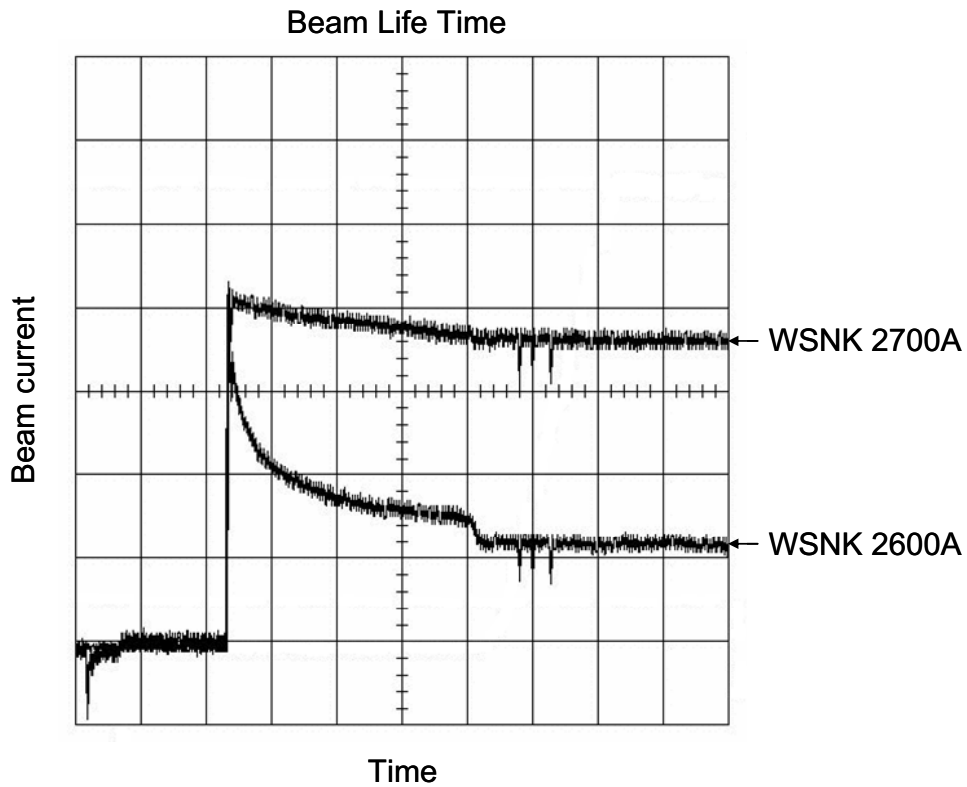


図 6-1-7 : AGS 加速器内のビーム電流

このように、Warm Snake の運転電流を 2600A にした場合、AGS 加速器にビームを入射した直後より著しくビーム電流が減少していることがわかる。2700A の場合ではビーム電流の現象はほとんど無く、安定したビームの加速が実現されている。図 6-1-8 は Booster 加速器および AGS 加速器それぞれの入射直後と出射直前のビーム強度の記録データである。

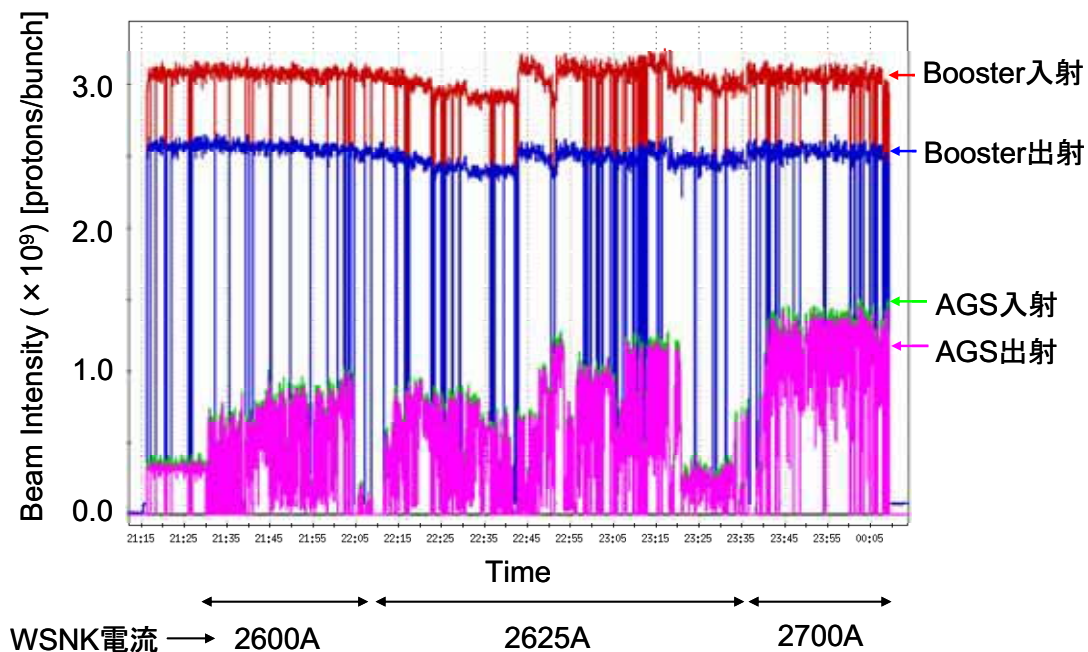


図 6-1-8 : Booster 加速器および AGS 加速器のビーム強度

図に示されているように、Warm Snake は 2600A、2625A、2700A で運転した。このグラフより、Warm Snake を 2700A で運転した場合、AGS 加速器内でより高いビーム強度を得られることがわかる。

以上のように、Warm Snake を 2700A で運転することで、AGS 加速器内で偏極陽子ビームを安定的に加速することが可能であることを確認した。しかしながら、ビーム位置測定の結果からは 2700A で運転した場合においても AGS 加速器のビーム閉軌道に対する影響があることがわかる。図 6-1-9 に Warm Snake を 2700A と 0A にした場合のビーム位置の差分を示す。

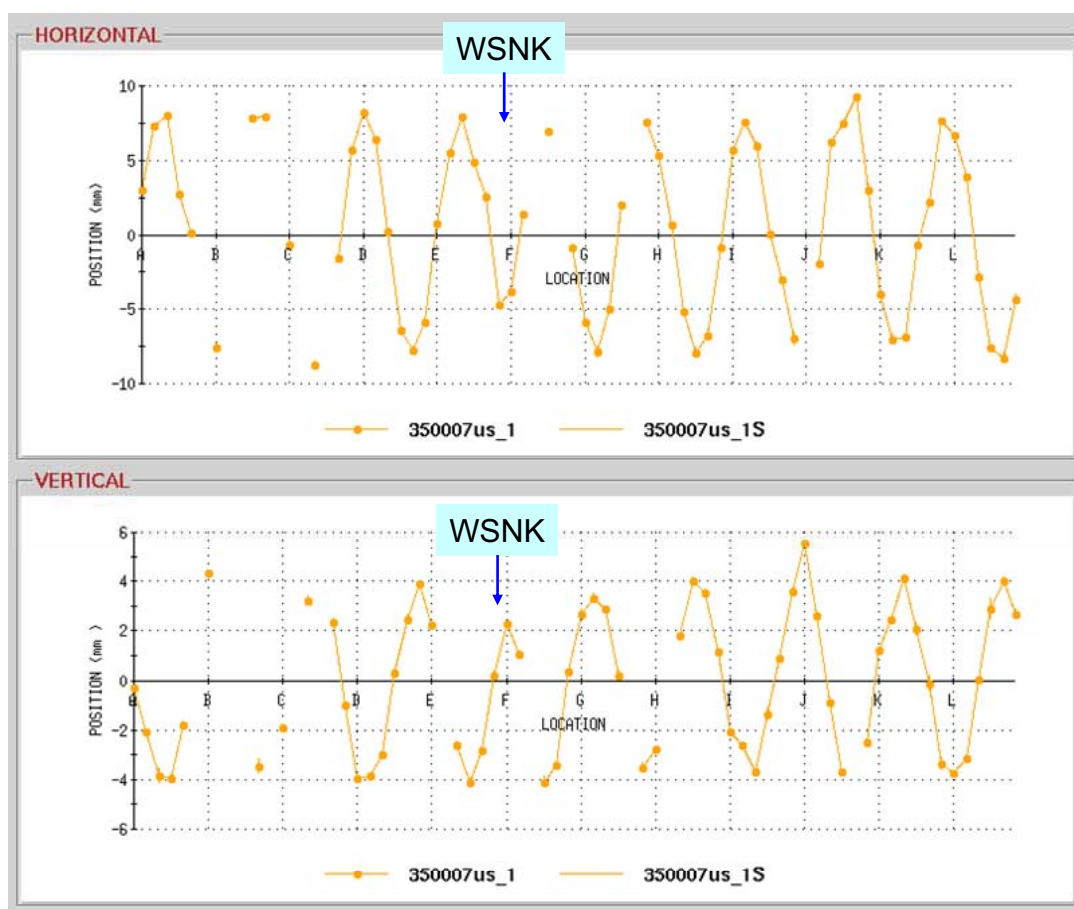


図 6-1-9 : Warm Snake ON/OFF のビーム位置の差分

この Warm Snake によるビーム位置の差異の最小化は翌年の加速器運転の課題とした。

次に Warm Snake を稼動した場合の AGS 加速器内におけるベータトロンチューンの変化を調べた。まず、加速器軌道計算ソフトウェア MAD (Methodological Accelerator Design) [6-14]を用いて Warm Snake を ON/OFF したときのベータトロンチューンを求めた。このとき Warm Snake は製作誤差を含む磁場計算モデルで 2700A としてヘリカルダイポール内の磁場を計算し、Warm Snake 内のフィールドマップを MAD 計算用に行列形式に変換し、軌道計算を行った。図 6-1-10 および図 6-1-11 は Warm Snake を ON/OFF にした場合の AGS 加速器内の水平方向および垂直方向のベータ関数の計算結果である。

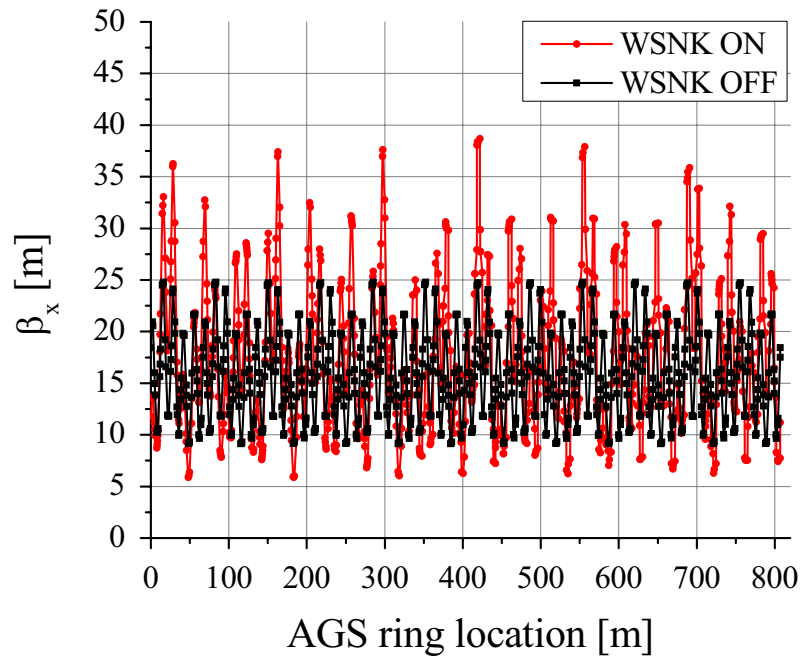


図 6-1-10 : 水平方向のベータ関数

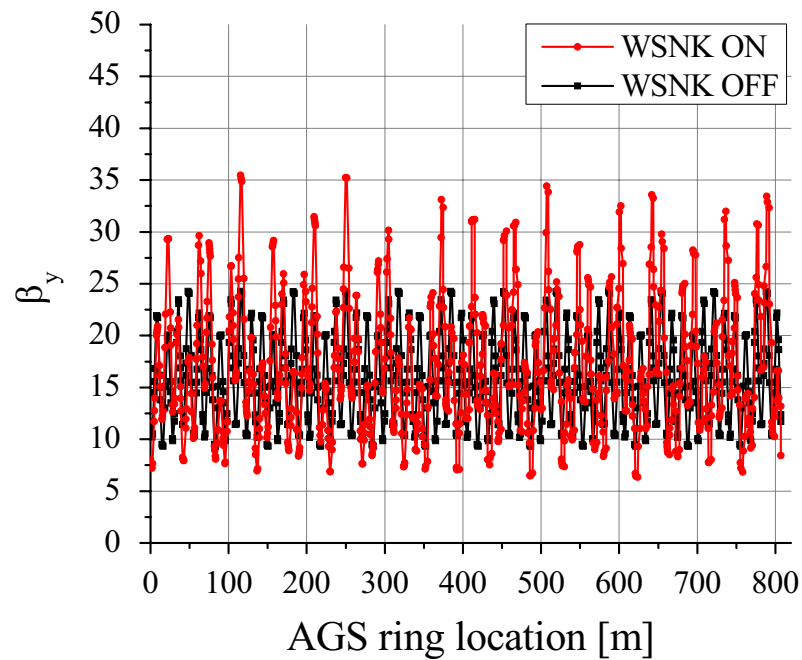


図 6-1-11 : 垂直方向のベータ関数

以上の計算結果からも Warm Snake が AGS 加速器内全体のビーム軌道に影響を及ぼしていることがわかる。このように AGS 加速器内のビームが Warm Snake によって影響を受けている原因は

- (1) Warm Snake 出口におけるビーム出射角度
- (2) ヘリカルダイポール内の 4 極成分磁場によるビームの収束効果
- (3) Warm Snake の入口および出口付近における 6 極成分磁場とビーム位置のオフセットによって生じるビームに対する収束効果

の 3 点が挙げられる。これらの原因から Warm Snake を ON(2700A)/OFF(0A)にした際の水平および垂直方向のベータトロンチューンに変化が生じる。表 6-1-1 にベータトロンチューンの計算結果と測定結果を示す。

表 6-1-1 : ベータトロンチューンの比較

	MAD		Measured	
	$v_x$	$v_y$	$v_x$	$v_y$
WSNK OFF	8.844	8.767	8.820	8.687
WSNK ON	8.895	8.826	8.880	8.741
WSNK ON-OFF	0.051	0.059	0.060	0.054
$\Delta v$ [%]	0.577	0.673	0.680	0.622

このようにベータトロンチューンの変化分の計算結果と測定結果はほぼ同じであるが、水平方向のベータトロンチューンの変化分が垂直方向より大きくなっている。ただし、いずれのベータトロンチューンも 1%以内の変化であり、AGS 加速器を運転する上では許容範囲である。ここで Warm Snake を ON/OFF した場合の AGS 加速器内のビーム電流を測定・比較したところ、図 6-1-12 のように Warm Snake ON のほうが Warm Snake OFF に比べてビームロスが少ない結果となった。

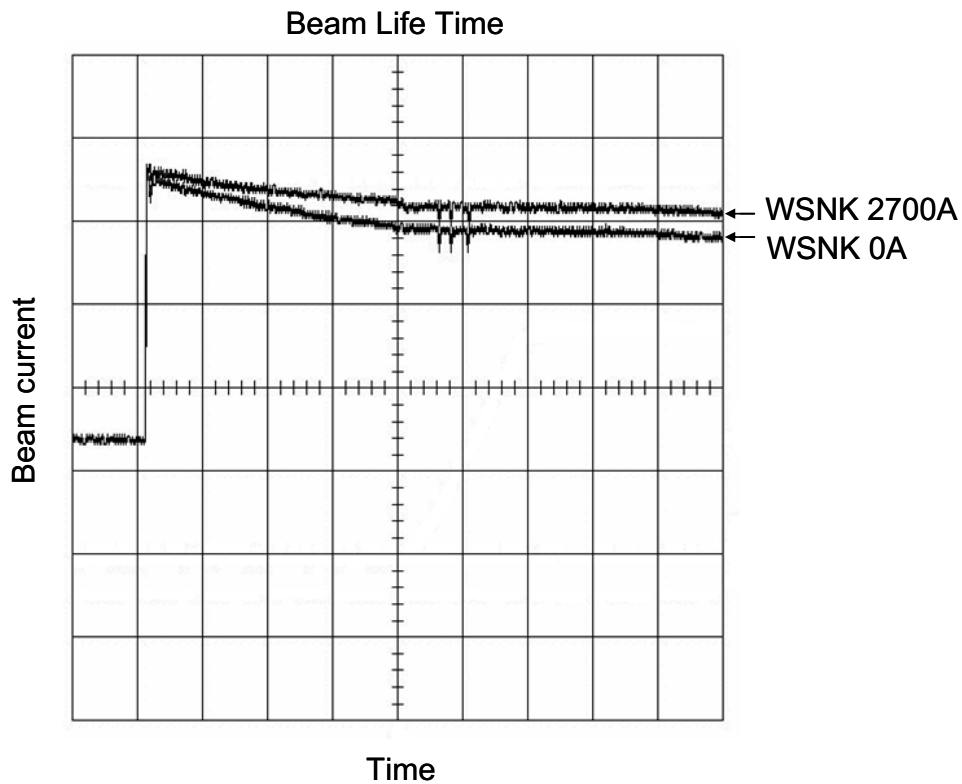


図 6-1-12 : Warm Snake ON/OFF の場合のビーム電流の比較

このように、Warm Snake は AGS 加速器内のビームに対してより良い影響を与えていることが分かる。

### 6-1-2 Warm Snake のスネーク強度

偏極陽子ビームはヘリカルダイポール内において螺旋軌道を描きながら進む。この軌道はビームエネルギーが低いとき大きい螺旋になる。すなわち、ヘリカルダイポール内における軌道が長くなるため、ビームエネルギーが低いとき Siberian Snake によって倒れる偏極の向きの変化量、すなわちスネーク強度は大きくなる。図 6-1-13 に Warm Snake のスネーク強度のビームエネルギー依存性を示す。

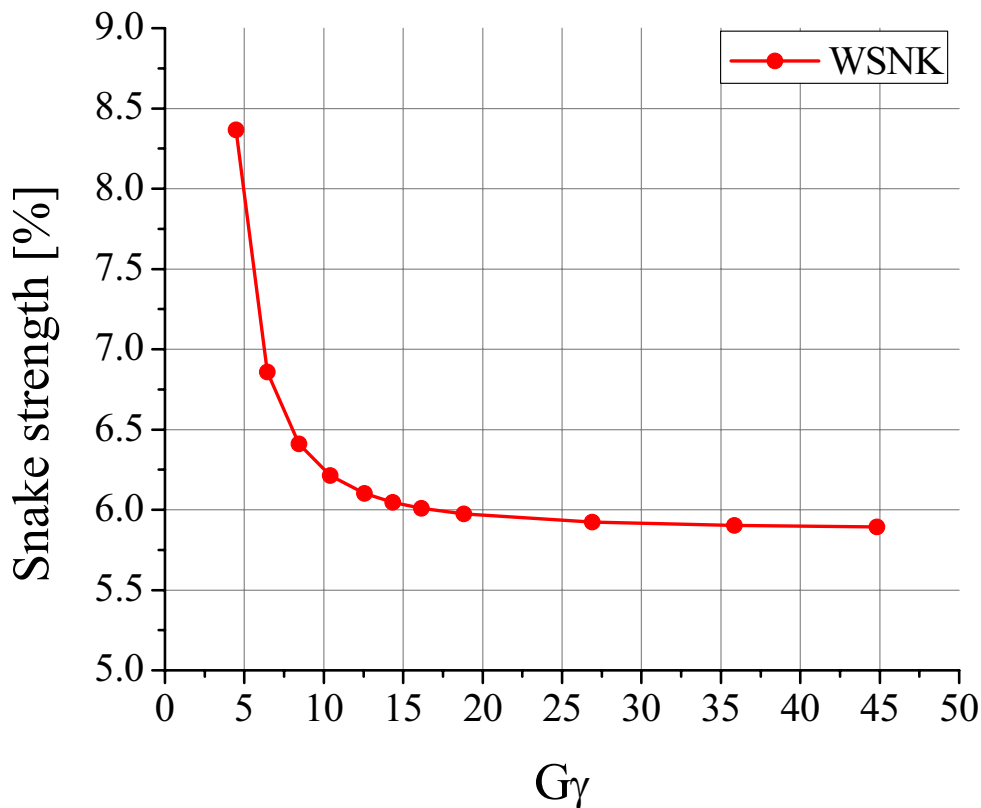


図 6-1-13 : Warm Snake のスネーク強度

入射エネルギーにおける Warm Snake のスネーク強度は 8.4%、出射エネルギーにおけるスネーク強度は 5.9%である。このスネーク強度を元に以下スピッチューンおよびスピンミスマッチの考察を行う。

### 6-1-3 スピッチューン

Siberian Snake を用いて円形加速器内で偏極の向きを変えるときスピッチューン  $\nu_{sp}$  は

$$\nu_{sp} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \cos \left( \frac{\delta}{2} \right) \cos(\pi G\gamma) \right\} \quad (6-1-1)$$

と表される。[6-22] ここで  $\delta$  は Siberian Snake によって傾けられる偏極の向きの変化量である。図 6-1-14 に Warm Snake を用いたときの入射エネルギーから最初の Vertical

intrinsic resonance までのスピントーンを示す。

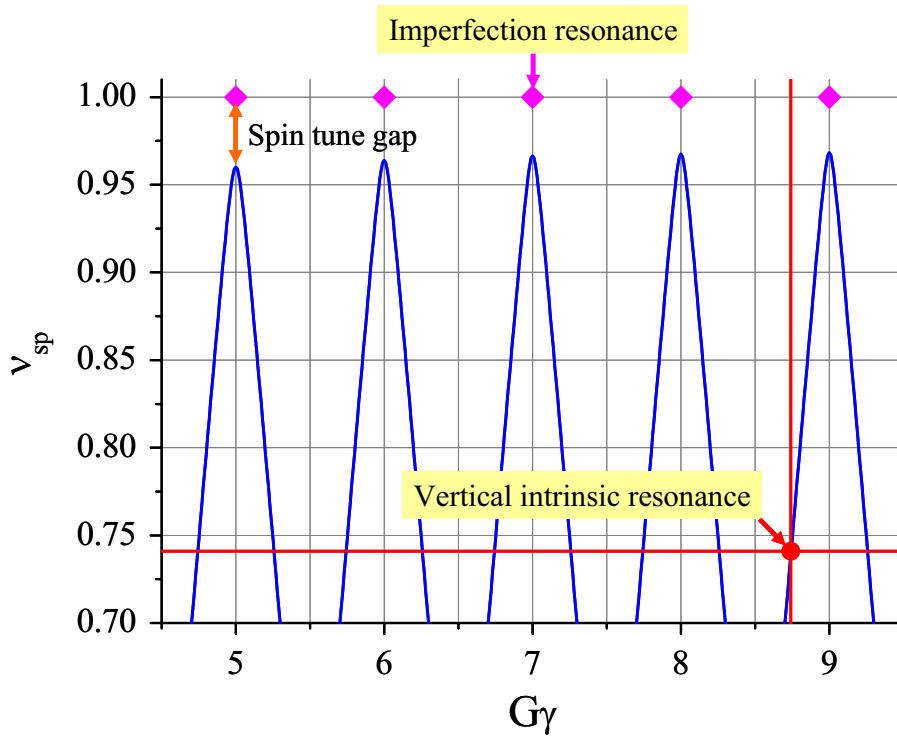


図 6-1-14 : Warm Snake を用いたときのスピントーン

グラフ中に示されているように Imperfection resonance はスピントーンが 1.00 かつ  $G\gamma$  が整数の点で生じる。ここで Warm Snake を稼動させることでスピントーンギャップを作ることができ、Imperfection resonance による減偏極を避けることができる。しかしながら、表 6-1-1 に示されているように Warm Snake を稼動したときの垂直方向のベータatronチューンは 8.741 であるため、Vertical intrinsic resonance は図 6-1-14 中の  $G\gamma = 8.741$  と  $\nu_{sp} = 0.741$  の交点で生じる。このように Vertical intrinsic resonance に対しては Warm Snake によるスピントーンギャップでは不十分であることがわかる。したがって、AGS 加速器における偏極陽子ビームの加速では Vertical intrinsic resonance を避けるため RF dipole を用いる。2004 年および 2005 年の AGS 加速器の運転はこれら Warm Snake と RF dipole の組み合わせる方法で行われた。

#### 6-1-4 スピンミスマッチ

Siberian Snake を稼動しないとき、スピンの安定的閉軌道 (Stable Spin Direction, SSD) は垂直方向 (上向きまたは下向き) である。しかしながら、Partial Siberian Snake を用いたとき Stable Spin Direction は円形加速器内で一意に決まる。ここでパウリ行列を

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (6-1-2)$$

としたとき、 $2 \times 2$  のスピン回転行列は

$$\begin{aligned} M_{\hat{n}}(\theta) &= e^{i\hat{n} \cdot \vec{\sigma} \theta / 2} = I \cos \frac{\theta}{2} + i\hat{n} \cdot \vec{\sigma} \sin \frac{\theta}{2} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} + in_z \sin \frac{\theta}{2} & (n_y + in_x) \sin \frac{\theta}{2} \\ (-n_y + in_x) \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} - in_z \sin \frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6-1-3)$$

となる。 $\hat{n}$  は Stable Spin Direction、 $\theta$  は円形加速器内におけるビームの位置である。例えば AGS 加速器の場合、入射点である L20 を起点としたとき C20 は  $\pi/2$ 、F20 は  $\pi$  である。したがって、スピン回転行列は

$$M_{\hat{n}}(\theta) = M_{\hat{n}}(\theta + 2\pi) \quad (6-1-4)$$

という条件をもち、One-turn matrix (spin-OTM) と呼ばれる。以下一例として出射点である H10 における Stable Spin Direction を求める。H10 から Warm Snake が設置されている E20 までを  $\theta_1$ 、E20 から H10 までを  $\theta_2$  としたとき、各区域の歳差運動角度  $\eta$  は

$$\eta_1 = G\gamma\theta_1, \quad \eta_2 = G\gamma\theta_2 \quad (6-1-5)$$

と表される。Warm Snake 内における歳差運動角度の変化を  $\eta_w$  としたとき H10 における spin-OTM は

$$M_{H10} = M_y(\eta_1) M_z(\eta_w) M_y(\eta_2) \quad (6-1-6)$$

となり、H10 における Stable Spin Direction は

$$\hat{n}_{H10} = \left( \frac{\Im(M_{12})}{\sin \pi \nu_{sp}}, \frac{\Re(M_{12})}{\sin \pi \nu_{sp}}, \frac{\Im(M_{11})}{\sin \pi \nu_{sp}} \right) \quad (6-1-7)$$

となる。ここで、 $\Re(M_{11}) = \cos \pi \nu_{sp}$  である。このようにして得られる Spin Stable Direction

を AGS 加速器内の全てのメインダイポール電磁石の後 (A1, A2, ..., L20) において求めた。Warm Snake を稼動したとき、AGS 加速器の入射エネルギー  $G\gamma = 4.5$  における Stable Spin Direction を図 6-1-15 に示す。

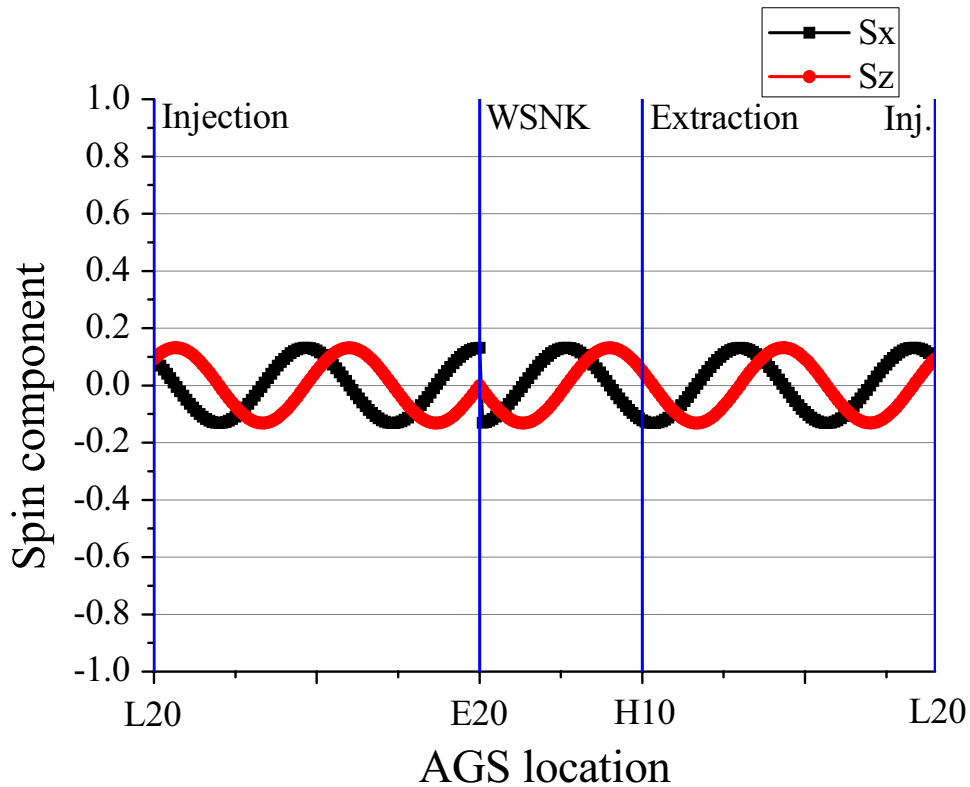


図 6-1-15 : Warm Snake を用いたときの入射エネルギーにおける SSD

このとき AGS 加速器の入射点である L20 における垂直方向のスピンコンポーネント  $S_y$  は 0.991 である。したがって、垂直方向を向いた Booster 加速器から供給される偏極陽子ビームは Warm Snake を稼動したときの AGS 加速器の Stable Spin Direction からの差異 (スピンミスマッチ) は少ないことがわかる。このとき Booster 加速器から 80% の偏極度を持つ偏極陽子ビームが AGS 加速器に入射されたとき、AGS 加速器入口におけるスピンミスマッチによって偏極度は  $80\% \times 0.991 = 79.28\%$  となる。

同様にして、AGS 加速器の出射エネルギー  $G\gamma = 46.5$  における Stable Spin Direction を図 6-1-16 に示す。

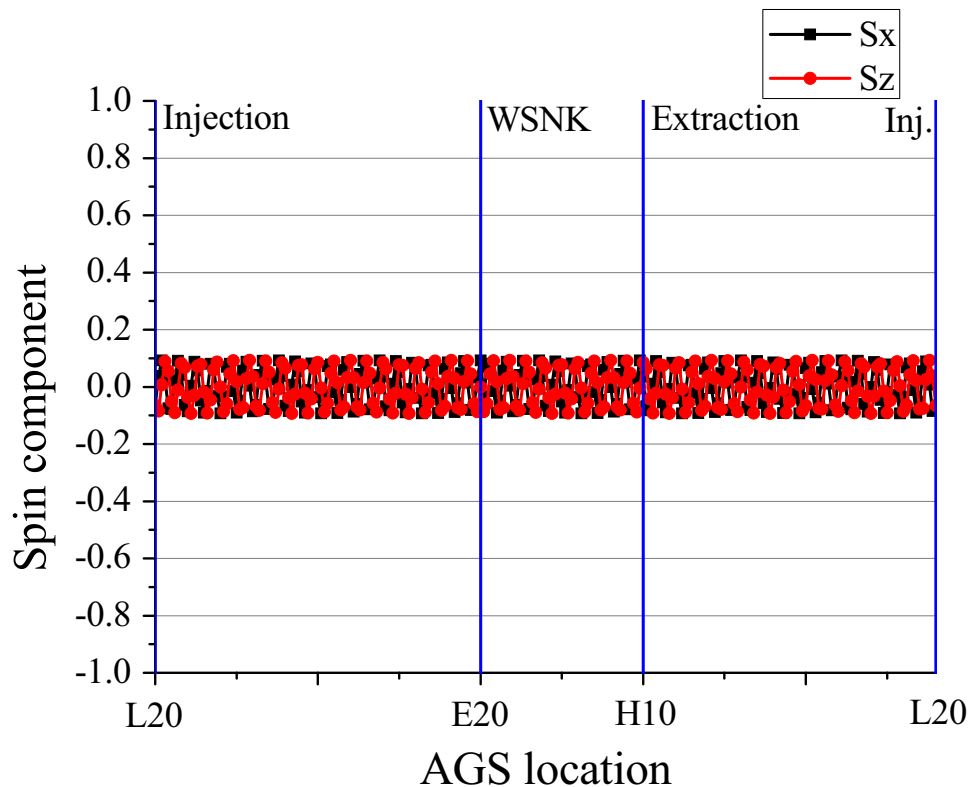


図 6-1-16 : Warm Snake を用いたときの出射エネルギーにおける SSD

このとき AGS 加速器の出射点である H10 における垂直方向のスピンコンポーネント  $S_y$  は 0.996 である。したがって AGS 加速器は偏極の向きが少しだけ傾いた偏極陽子ビームを RHIC 加速器に供給することになる。

以上のように、Warm Snake を稼動した場合、AGS 加速器の入口および出口においてスピンミスマッチが生じるが、非常に小さい差異である。したがって、スピンミスマッチによる減偏極は微少である。

次に、スピンミスマッチの入射エネルギーおよび出射エネルギーの依存性を求めた。図 6-1-17 はビーム入射点である L20 における入射エネルギー前後の垂直方向のスピンコンポーネント  $S_y$  のプロットである。

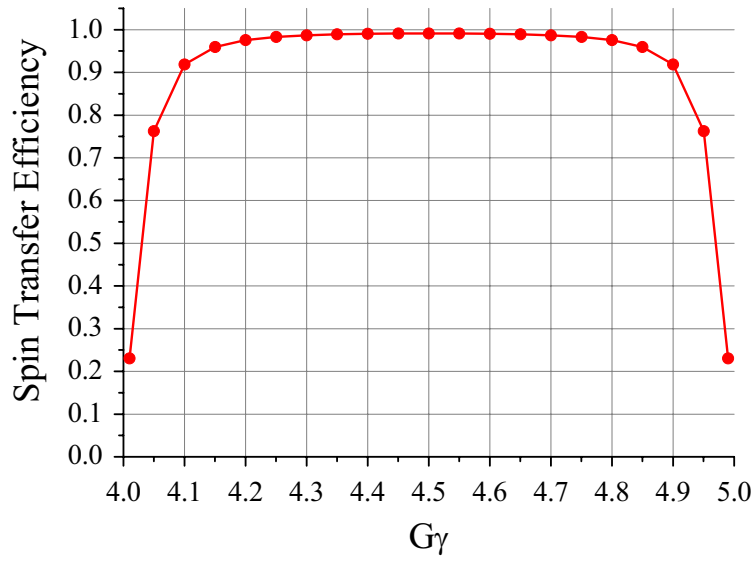


図 6-1-17 : AGS 加速器入射点における垂直方向のスピンコンポーネント

このように  $G\gamma = 4.3 \sim 4.7$  付近ではスピンコンポーネントはほぼ垂直であるため、この範囲のビームエネルギーで入射したときの減偏極は非常に少ない。同様にして AGS 加速器の出射点における垂直方向のスピンコンポーネントを求めた。

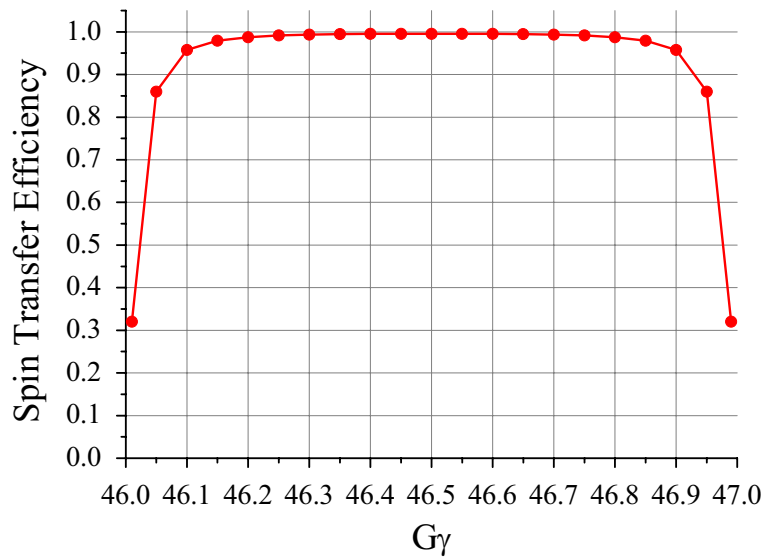


図 6-1-18 : AGS 加速器出射点における垂直方向のスピンコンポーネント

AGS 加速器の出射点においても  $G\gamma = 46.3 \sim 46.7$  の範囲であれば偏極度に大きな影響を与えずに RHIC 加速器へビームを供給することができる。

以上のスピンミスマッチの考察より、Warm Snake を稼動した場合においても AGS 加速器の入射および出射点におけるスピンミスマッチは小さく、ビームの偏極度に対して大きな悪影響を及ぼすことは無いことがわかった。

### 6-1-5 偏極度の測定

まず AGS 加速器に偏極陽子ビームを入射した後、ビームを加速せずに偏極度の測定を行った。この時点で偏極度は 75%~80%であったため、LINAC 出口から AGS 加速器入口の間で大きな減偏極が起きていないことが確認された。次にビームエネルギーを徐々に上げながら p-C CNI 偏極度計[6-15, 6-16, 6-17]で Raw asymmetry の測定を行った。測定結果を図 6-1-19 に示す。

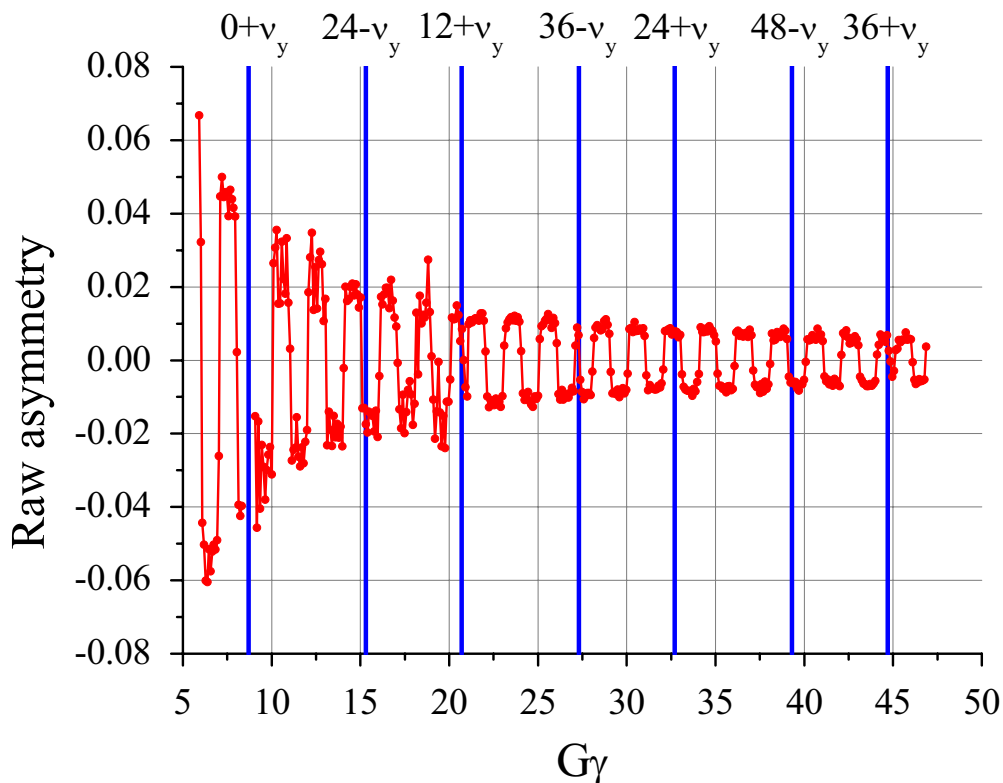


図 6-1-19 : Raw asymmetry の測定結果

グラフ中の青線は Vertical intrinsic resonance の共鳴点を表す。これらの Vertical intrinsic resonance のうち  $G\gamma = 0 + \nu_y$ ,  $12 + \nu_y$ ,  $36 - \nu_y$ ,  $36 + \nu_y$  の4点では減偏極効果が大きい  
ため RF dipole を用いて減偏極を避けている。通常  $G\gamma = n$  ( $n$ は整数)のとき偏極の向き  
が上向き(下向き)から下向き(上向き)にフリップしているが、RF dipole を用いて  
いる共鳴点では偏極の向きがフリップしていないことがグラフより確認できる。これは  
RF dipole によって起きる現象である。RF dipole は4点の強い Vertical intrinsic resonance  
に対してのみ使用可能であり、残りの  $G\gamma = 24 - \nu_y$ ,  $24 + \nu_y$ ,  $48 - \nu_y$  の弱い Vertical  
intrinsic resonance では RF dipole を用いることはできない。したがって、弱い Vertical  
intrinsic resonance に対しては何も対策を講じていない状況であるが、極端な減偏極は起  
きていないことが図 6-1-19 よりわかる。

次に Transverse coupling resonance[6-18, 6-19]における減偏極について Warm Snake を  
用いた2004年の加速器実験データと Solenoidal Snake[6-20, 6-21]を用いた2003年のデー  
タを比較した。2003年のデータに関しては  $G\gamma$  が21.5以上のデータのみであったため、  
 $G\gamma = 21.5 \sim 46.5$ の範囲での比較となった。図 6-1-20 に Raw asymmetry の絶対値を比較  
したプロットを示す。

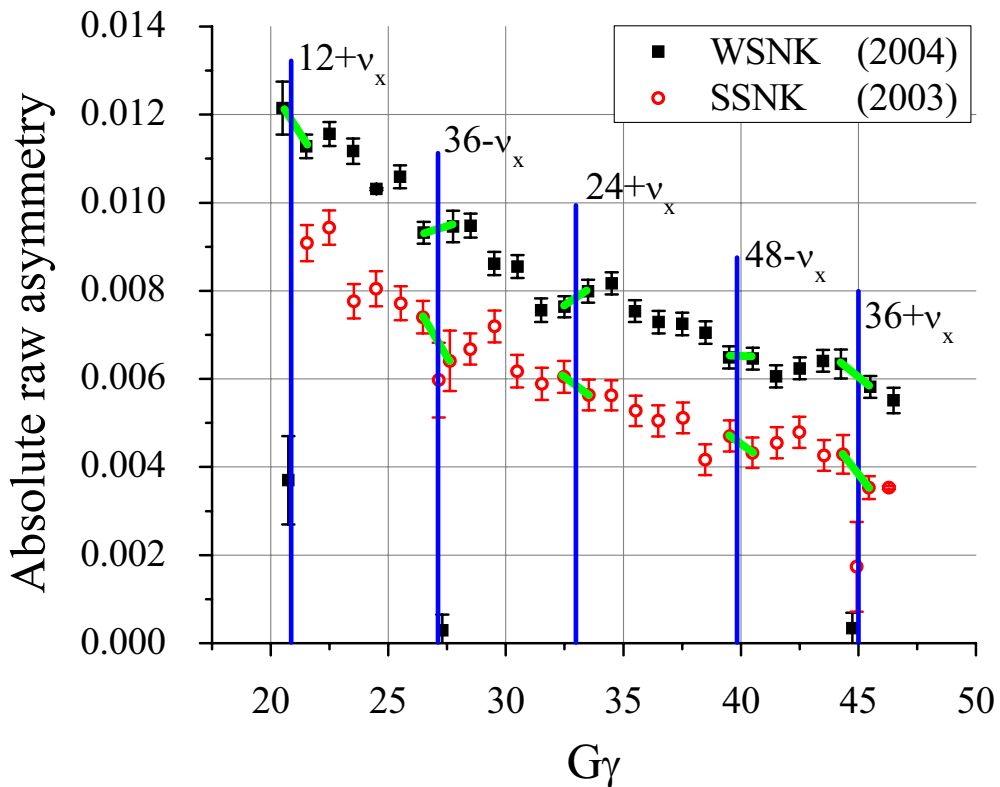


図 6-1-20 : WSNK と SSNK の Raw asymmetry の比較

図 6-1-20 中の縦の青線は Transverse coupling resonance の位置を表す。このグラフから分かるように Transverse coupling resonance において Warm Snake のほうが Solenoidal Snake に比べて Raw asymmetry が改善されていることがわかる。表 6-1-2 に各 Transverse coupling resonance における Raw asymmetry の数値比較を示す。

表 6-1-2 : Transverse coupling resonance における Raw asymmetry の比較

Gγ	SSNK	WSNK	WSNK-SSNK
36- $\nu_x$	-13.4%	+1.5%	+14.9%
24+ $\nu_x$	-6.9%	+4.6%	+11.5%
48- $\nu_x$	-8.3%	-0.5%	+7.8%
36+ $\nu_x$	-17.5%	-8.2%	+9.3%

このように Solenoidal Snake の代わりに Warm Snake を用いることによって Transverse coupling resonance による減偏極効果を減らすことに成功した。Solenoidal Snake を用いた 2003 年の加速器実験における平均偏極度は 40%であったところ、Warm Snake を用いた 2004 年には平均偏極度 50%を達成した。すなわち 2003 年に比べ 25%もの偏極度の向上を実現した。[6-4]

この AGS 加速器の偏極度の向上によって RHIC 加速器における偏極度の調整が容易になり、RHIC 加速器の偏極度も向上した。PHENIX 検出器における偏極度  $P$ 、積分輝度  $L$  および Figure of Merit ( $FoM$ ) の 2003 年と 2004 年の比較を表 6-1-3 に示す。2003 年および 2004 年の PHENIX 検出器における衝突実験は縦偏極した偏極陽子ビームであったため  $FoM$  は偏極度  $P$  の 4 乗と積分輝度  $L$  の積分值となる。

表 6-1-3 : PHENIX 検出器における実験データ

Year	P [%]	L [ $\text{pb}^{-1}$ ]	$P^4L$ [ $\text{nb}^{-1}$ ]
2003	27	0.35	1.86
2004	40	0.12	3.07

2004 年の加速器実験では 2003 年に比べて積分輝度が半分以下であった。これは 2004 年に AGS 加速器および RHIC 加速器における偏極度向上の調整運転を行っていたため衝突実験の時間が少なかったからである。しかしながら、偏極度の向上によって 2004 年の Figure of Merit は 2003 年に比べて 2 倍弱となった。すなわち半分以下の実験時間で 2 倍弱の実験データ量を取得できたことになる。この偏極度向上の成功を受け、2005 年は長時間の衝突実験データ用ビームタイムの予算を取得することができた。

### 6-1-6 ビーム軌道の最適化

2005 年の AGS 加速器の運転は 2004 年と同様に Warm Snake と RF dipole の組み合わせで行われた。この年は Warm Snake に対して以下の調整を行った。[6-3]

- (1) Warm Snake 前後の水平・垂直方向のビーム軌道調整用電磁石を用いることで Warm Snake の入口におけるビーム入射位置の調整
- (2) Warm Snake の運転電流の微調整

まず Warm Snake の電流を 2700A に設定して (1) の調整を行った。Warm Snake に対するビーム入射位置を水平および垂直方向に $\pm 20\text{mm}$  だけ変化させた場合の Warm Snake ON/OFF の AGS 加速器内における水平方向のビーム位置の変化を表すプロットを図 6-1-21 に、垂直方向のビーム位置の変化を図 6-1-22 に示す。

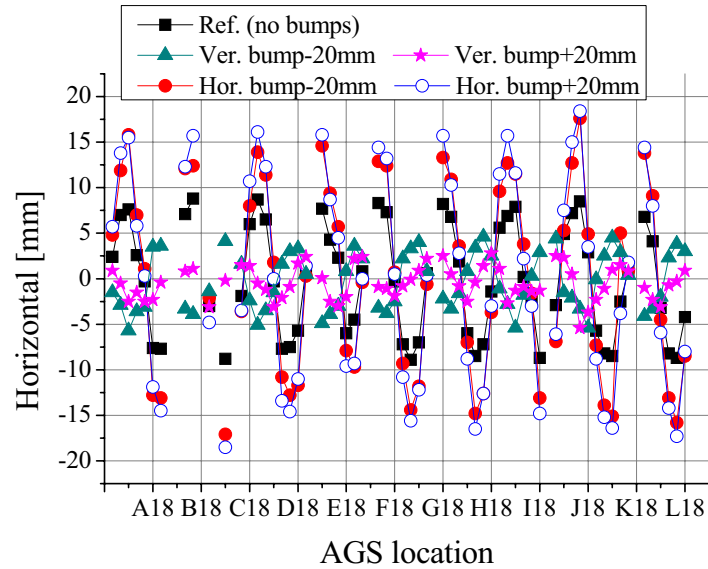


図 6-1-21 : ビーム入射位置を変えたときの水平方向のビーム位置の変化

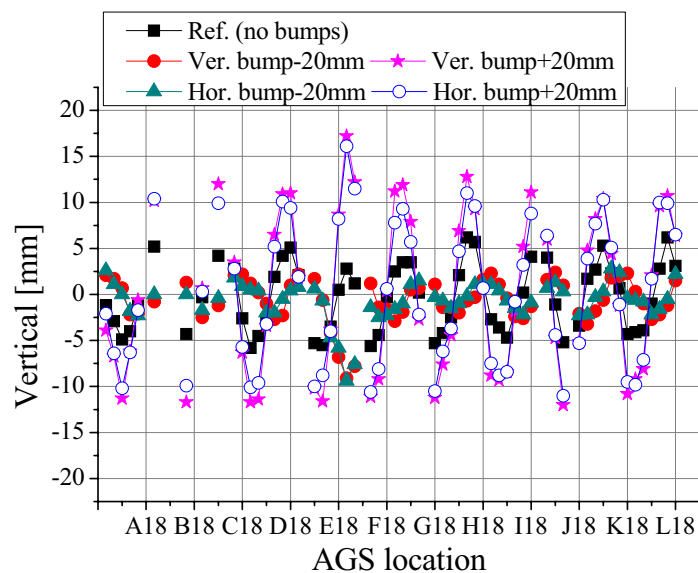


図 6-1-22 : ビーム入射位置を変えたときの垂直方向のビーム位置の変化

図 6-1-21 より、垂直方向に+20mm および-20mm だけビーム入射位置を変化させたとき、AGS 加速器内の水平方向のビーム位置の変化が少なくなった。逆に水平方向に±20mm だけビーム入射位置を変化させた場合、水平方向のビーム位置の変化が大きくなり、悪影響を及ぼすことが分かった。

図 6-1-22 からは水平および垂直方向の+20mm への入射位置の変化によって AGS 加速器内の垂直方向のビーム位置の変化が大きくなってしまふことが分かる。ビーム入射位置を水平および垂直方向にそれぞれ-20mm だけ変化させた場合、AGS 加速器内のビーム位置の変化が小さくなることが分かった。表 6-1-4 に Warm Snake 入口における水平および垂直方向のビーム入射位置を変化させたときの AGS 加速器内の水平および垂直方向のビーム位置の変化分の平均値を示す。

表 6-1-4 : Warm Snake 入口におけるビーム入射位置を変化させたときの AGS 加速器内のビーム位置の変化分の平均値

Warm Snake 入口の ビーム入射位置	ビーム位置平均変化量 [mm]	
	水平方向	垂直方向
Ref. (0mm)	5.36	3.25
水平(-20mm)	9.14	1.55
水平(+20mm)	9.83	6.86
垂直(-20mm)	2.83	1.94
垂直(+20mm)	1.61	7.66

以上より、垂直方向に-20mm だけビーム入射位置を変化させることで AGS 加速器内の水平および垂直方向のビーム位置の変化を小さく抑えることができることが分かった。

次に (2) の Warm Snake の運転電流を微調整することで AGS 加速器内のビーム位置の変化を調べた。

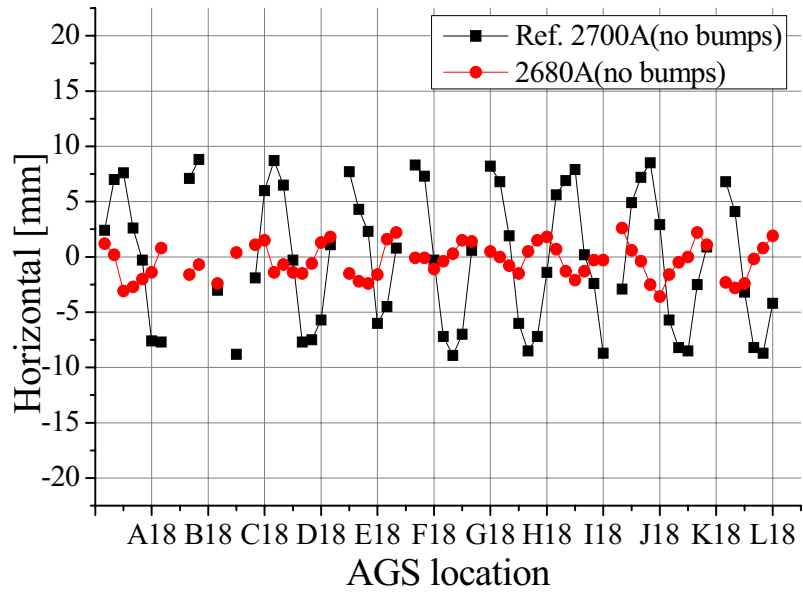


図 6-1-23 : Warm Snake の運転電流を変えたときの水平方向のビーム位置の変化

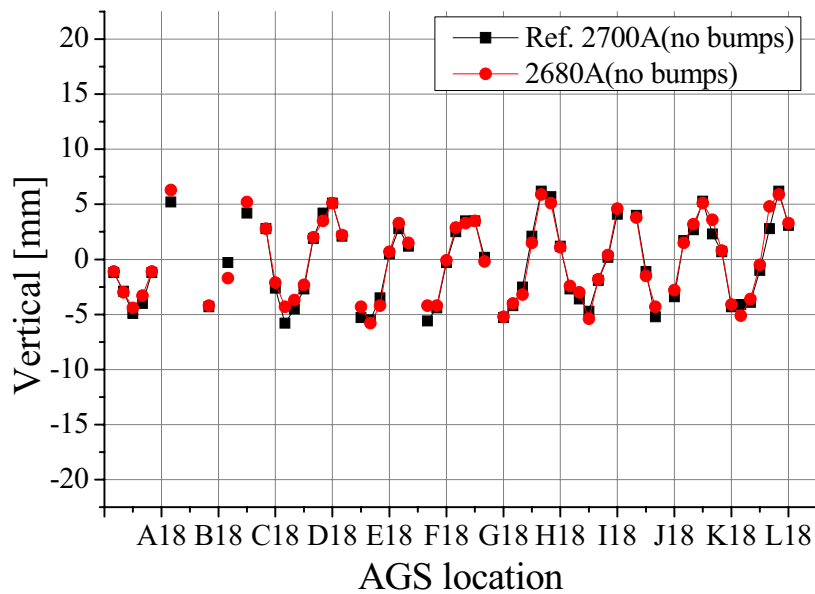


図 6-1-24 : Warm Snake の運転電流を変えたときの垂直方向のビーム位置の変化

図 6-1-23 から分かるように Warm Snake の運転電流を調整することで AGS 加速器内の水平方向のビーム位置の変化量を小さくすることができる。しかしながら、図 6-1-24 に示されているように、垂直方向の変化に対しては Warm Snake の運転電流による影響は少ないことがわかる。Warm Snake の運転電流を変化させたときの AGS 加速器内のビーム位置の平均変化量を表 6-1-5 に示す。

表 6-1-5 : Warm Snake の運転電流を変化させたときの  
AGS 加速器内のビーム位置の変化分の平均値

Warm Snake の 運転電流	ビーム位置平均変化量 [mm]	
	水平方向	垂直方向
2700A (Ref.)	5.36	3.25
2680A	1.33	3.23

以上のように、Warm Snake に対する入射位置の調整と運転電流の調整によって、Warm Snake を ON/OFF にしたときの AGS 加速器内のビーム位置の変化量を小さくすることができることが分かった。次にこの 2 種類の調整を組み合わせることでビーム位置の変化量の最小化を行った。Warm Snake の運転電流 2700A で Warm Snake に対するビームの入射位置を変化させないときの AGS 加速器内におけるビーム位置を基準とする。まず、表 6-1-5 のように水平方向のビーム位置の変化量を小さくするため、運転電流を 2680A にした。その上でビームの垂直方向の入射位置を調整した。さらに水平および垂直方向のビーム位置の変化量を小さくするため、運転電流は 2680A のままで、Warm Snake 入口におけるビームの入射位置を垂直方向に -10mm、-20mm と変化させた。図 6-1-25 および図 6-1-26 に測定結果のプロットを示す。

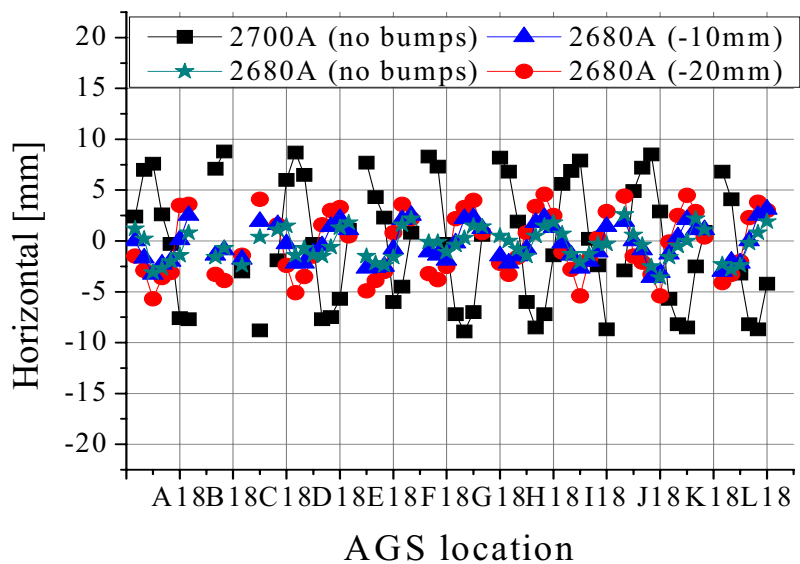


図 6-1-25 : Warm Snake に対する垂直方向のビーム入射位置と Warm Snake の運転電流変えたときの水平方向のビーム位置の変化

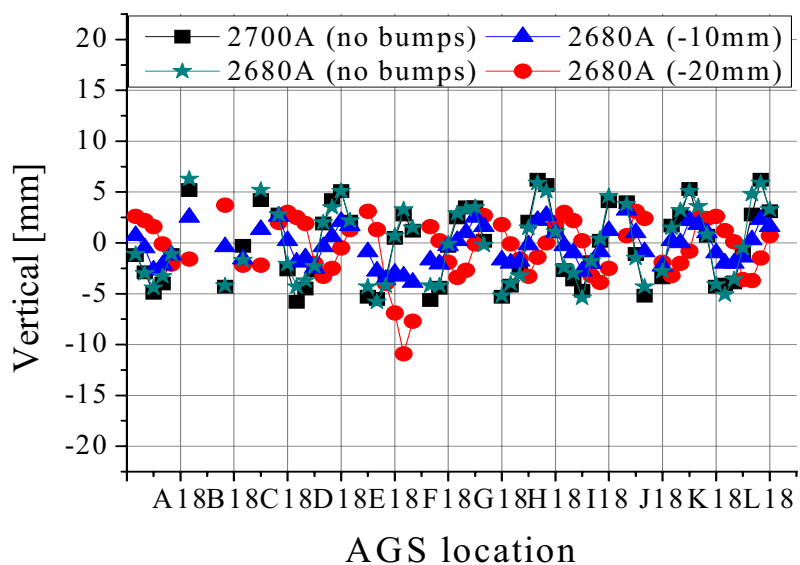


図 6-1-26 : Warm Snake に対する垂直方向のビーム入射位置と Warm Snake の運転電流変えたときの垂直方向のビーム位置の変化

以上の測定結果を元に AGS 加速器内のビーム位置変化量の平均値を表 6-1-6 にまとめた。

表 6-1-6 : Warm Snake の運転電流および Warm Snake に対するビーム入射位置を変化させたときの AGS 加速器内のビーム位置の変化分の平均値

Warm Snake の 運転電流	Warm Snake 入口の ビーム入射位置	ビーム位置平均変化量	
		水平方向	垂直方向
2700A	0mm	5.36	3.25
2680A	0mm	1.33	3.23
2680A	垂直方向(-10mm)	1.65	1.61
2680A	垂直方向(-20mm)	2.83	2.36

このように Warm Snake の運転電流を 2680A に設定し、Warm Snake 入口におけるビームの入射位置を垂直方向に-10mm 変化させることで、Warm Snake を ON/OFF したときの AGS 加速器内の水平および垂直方向のビーム位置の変化量を最小化することができる。

### 6-1-7 偏極度のビーム強度依存性

次に偏極度のビーム強度依存性について測定を行った。

RHIC 加速器の衝突点における目標値は偏極度 70%とビーム強度  $2.0 \times 10^{11}$  protons/bunch である。しかしながら、AGS 加速器から RHIC 加速器へ供給されるビームの強度は  $1.0 \times 10^{11}$  protons/bunch である。これは AGS 加速器の出射エネルギーにおける偏極度がビーム強度依存性を持つためである。図 6-3-6 に Warm Snake と RF dipole の組み合わせ運転のときの偏極度のビーム強度依存性の測定結果を示す。このとき、偏極イオン源に Rb セルの温度を上げ、イオン源から出力されるビームの強度を強くし、LINAC における Chopper を用いてビーム進行方向に対してビームをカットする方法でビーム強度を調整した。

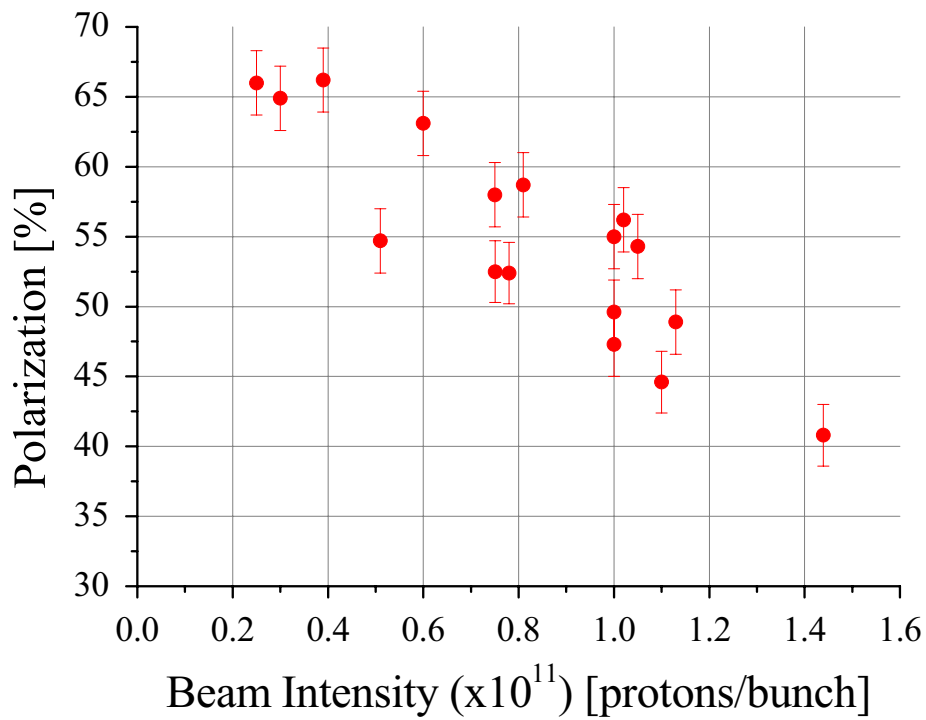


図 6-1-27：偏極度のビーム強度依存性

このように、偏極度は比較的ビーム強度に対する依存性が強い。このひとつの原因としてビーム加速中のエミッタンスの増大を挙げることができる。図 6-1-28 および図 6-1-29 に垂直方向・水平方向のエミッタンスのビーム強度依存性を測定した結果を示す。グラフ中の 380ms および 600ms はビーム入射後の時間である。380ms はビームを加速する直前、600ms は Transition energy を超えた後の時間である。

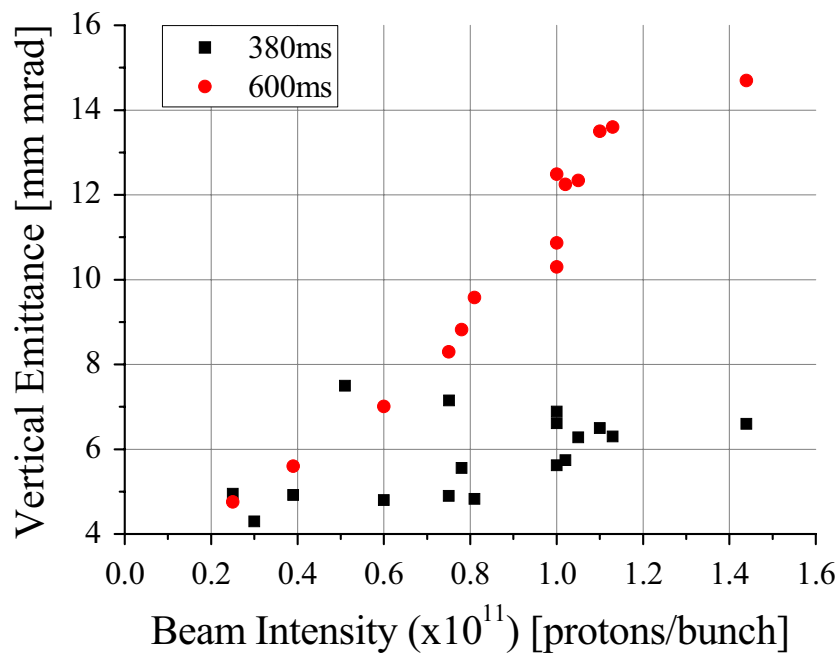


図 6-1-28 : 垂直方向のエミッタンスのビーム強度依存性

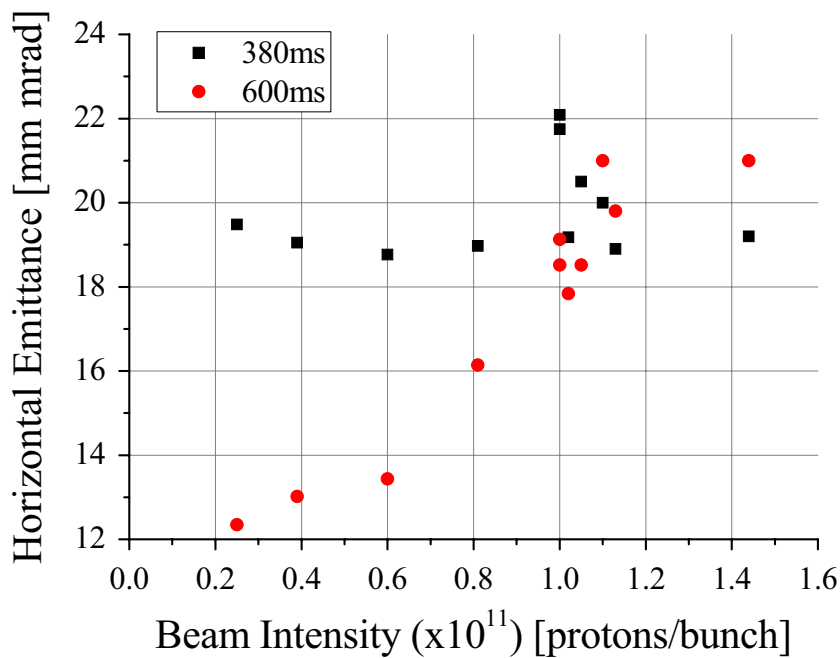


図 6-1-29 : 水平方向のエミッタンスのビーム強度依存性

これらの測定結果より、垂直方向のエミッタンスはビーム強度が強いほどビームを加速した際のエミッタンスの増大が大きくなり、水平方向のエミッタンスはビーム強度が弱いほどエミッタンスが減少することがわかる。エミッタンスが大きくなるとビーム中心から外れた偏極陽子が増えてしまい、ビームの偏極度が落ちてしまうものと考えられる。この偏極度とビーム強度およびエミッタンスの依存性に関する加速器実験は翌 2006 年において再度詳細に測定を行った。

### 6-1-8 2005 年までの Figure of Merit の向上

Warm Snake の導入および AGS 加速器内のビーム軌道の最適化[6-3]によってビーム強度  $1.0 \times 10^{11}$  protons/bunch における 2005 年の平均偏極度は 55% を達成した。これは Warm Snake を導入する以前の 2003 年の偏極度 40% (ビーム強度 =  $1.0 \times 10^{11}$  protons/bunch) に対して 37.5% もの向上である。表 6-1-7 に 2003 年から 2005 年の PHENIX 検出器における縦偏極衝突実験の偏極度、積分輝度、Figure of Merit を示す。

表 6-1-7 : PHENIX 検出器における縦偏極衝突実験データ

Year	P [%]	L [ $\text{pb}^{-1}$ ]	$P^4L$ [ $\text{nb}^{-1}$ ]
2003	27	0.35	1.86
2004	40	0.12	3.07
2005	46	3.40	152.23

このように、2005 年の Figure of Merit は 2003 年の 82 倍、2004 年の 50 倍に相当する膨大なデータ量を取得できた。2005 年の偏極陽子ビームの加速・衝突実験では、横偏極の実験も行われた。これは 2002 年にも行われた実験であり、表 6-1-8 に横偏極の Figure of Merit の比較を示す。

表 6-1-8 : PHENIX 検出器における横偏極衝突実験データ

Year	P [%]	L [pb <sup>-1</sup> ]	P <sup>2</sup> L [nb <sup>-1</sup> ]
2002	15	0.15	3.38
2005	47	0.16	35.34

横偏極の場合、Figure of Merit は偏極度の 2 乗と積分輝度の積になる。積分輝度は 2002 年と 2005 年はほぼ同じであるが、偏極度が格段に向上しているため、2005 年の Figure of Merit は 2002 年の 11 倍となった。

## 6-2 2台の Partial Siberian Snake と偏極陽子の振る舞い

2004年まで AGS 加速器では Warm Snake と RF dipole の組み合わせることで減偏極共鳴を避け、偏極度 50% の偏極陽子ビームを RHIC 加速器に供給していた。しかしながら、RF dipole は Vertical intrinsic resonance のうち比較的減偏極効果の強い 4 つの共鳴点のみでしか運転できないため、残りの Vertical intrinsic resonance については対策を講じていなかった。常電導の Partial Siberian Snake では 1.5T 程度の磁場強度が限界であり、Vertical intrinsic resonance を乗り越えるほどのスネーク強度を得ることができない。そこで、より強い磁場を出せる超伝導ヘリカルダイポール型 Partial Siberian Snake (Cold Snake、CSNK) [6-11] の開発が BNL にて行われた。この Cold Snake を用いることで、全ての Vertical intrinsic resonance および Imperfection resonance を乗り越えることが可能である。しかしながら、Cold Snake を単体で用いた場合、AGS 加速器の入口においてリング内のスピン閉軌道の向きと入射ビームのスピン向きが異なるためスピンミスマッチと呼ばれる現象が生じ、偏極度が落ちてしまう。この問題を解決するため、AGS 加速器では Warm Snake と Cold Snake の組み合わせ運転を行った。[6-12, 6-13] 本節ではこの 2 台の Partial Siberian Snake を組み合わせ運転した場合のスピンチューンおよびスピンミスマッチの計算について考察を行う。

### 6-2-1 超伝導ヘリカルダイポール型 Partial Siberian Snake

2005 年に AGS 加速器用の Cold Snake が完成した。図 6-2-1 に Cold Snake の三次元磁場計算のモデルを示す。

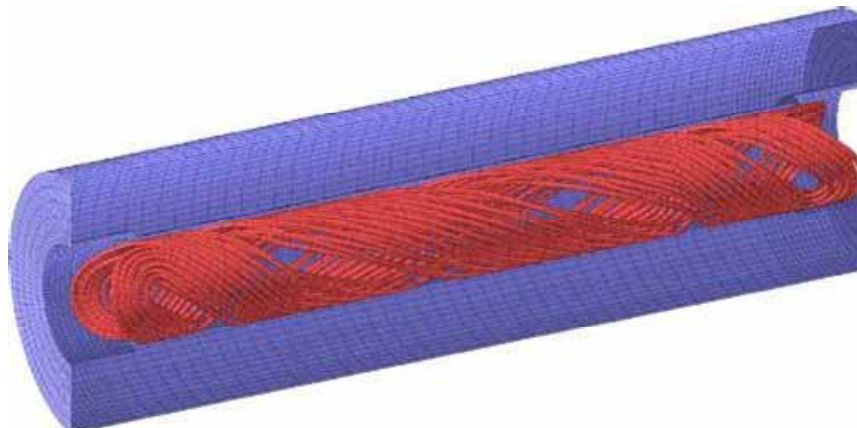


図 6-2-1 : Cold Snake の三次元磁場計算モデル

図中の赤い部分はヘリカルコイル、青い部分は鉄製のリターンヨークである。Cold Snake も単体で電磁石の出入口におけるビーム位置のオフセットと出射角度を持たないようにするため、ダブルピッチ構造を持つ。図 6-2-2 は製作中の超伝導ヘリカルコイルの写真、図 6-2-3 は AGS 加速器に導入された Cold Snake の写真である。また、表 6-2-1 は Cold Snake の設計値をまとめたものである。



図 6-2-2 : 製作中の超伝導ヘリカルコイル



図 6-2-3 : AGS 加速器に導入された Cold Snake

表 6-2-1 : Cold Snake の設計値

Design field	3.0T
Operating current	350A
Quench field	4.1T
Quench current	500A
Operating temperature	4.5K
Rapid pitch	0.3920deg/mm
Rapid pitch length	577mm each
Slow pitch	0.2053deg/mm
Slow pitch length	786mm

Cold Snake は鉄芯による磁場飽和による影響が少ないため、運転電流を変えた場合でも積分磁場に与える影響は少なく、Cold Snake の入口出口におけるビーム位置のオフセットや出射角度に影響は無い。したがって、Cold Snake は磁場の強さを選ぶことが可能であり、偏極の向きを変えるスネークの強さも可変である。図 6-2-4 に Cold Snake の中心磁場が 2.5T、2.0T、1.5T の場合のスネーク強度と Warm Snake のスネーク強度の比較およびビームエネルギー依存性を示す。

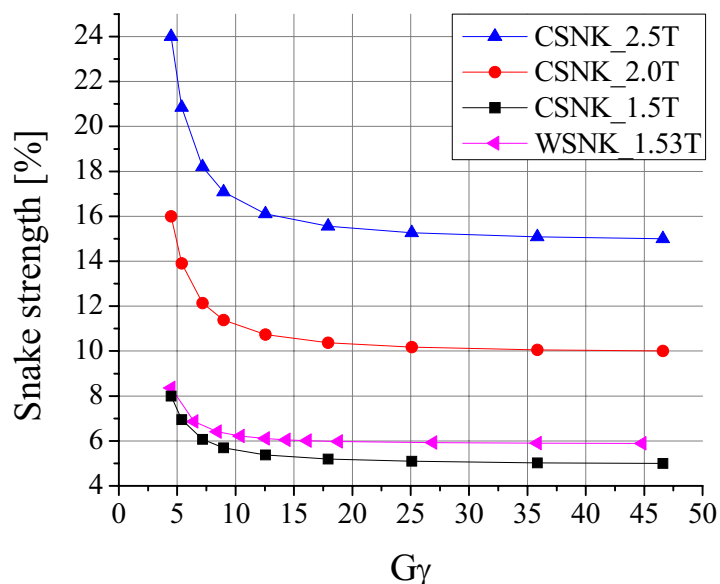


図 6-2-4 : Cold Snake と Warm Snake のスネーク強度の比較  
およびスネーク強度のエネルギー依存性

Cold Snake の運転電流は可変であるが、ビームエネルギーのランプアップと同じ速さで運転電流を変化させると Cold Snake はクエンチを起こしてしまう。そのため、Cold Snake はある一定の運転電流に設定し、ビームの加速中は運転電流を変化させずに一定の磁場を出力させる。

以上のように、Cold Snake はビームを入射する前にゆっくり運転電流を変化させることでスネーク強度を変えることができ、出力磁場が強いという点で Warm Snake より優位ではあるものの、AGS 加速器は常電導電磁石のみで構成されている加速器であったため、Cold Snake 用に新たに冷却施設を追加する必要があった。

Cold Snake は 2005 年に完成し、AGS 加速器に導入されたが、RHIC 加速器への偏極陽子ビームの供給は Warm Snake と RF dipole の組み合わせ運転で行われた。RHIC にビームを供給した後、次のビーム供給まで数時間の空き時間があるため、この間に Cold Snake を用いた AGS 加速器のセットアップおよびテストを行った。このテストは Warm Snake を用いずに 2.5T の Cold Snake のみを用いた場合と Warm Snake と 2T の Cold Snake を組み合わせた場合（ダブルスネーク運転法）の 2 つのケースで行った。

## 6-2-2 Double snake のスピントーション

ダブルスネーク運転法はスピントーションおよびスピンミスマッチの両方に対して効果がある。ただし、この効果を最も効果的に引き出すためには Snake 電磁石のリング内における配置が重要である。式(6-2-1)に Cold Snake と Warm Snake を AGS 加速器リングの 1/3 対称の位置に置いた場合のスピントーションの式を示す。

$$\nu_{sp} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \cos\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos(\pi G\gamma) - \sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{3} G\gamma\right) \right\} \quad (6-2-1)$$

$\delta_1$  および  $\delta_2$  はそれぞれのスネークによって傾けられる偏極の向きの変化量である。この式から得られるスピントーションのグラフを図 6-2-5 に示す。

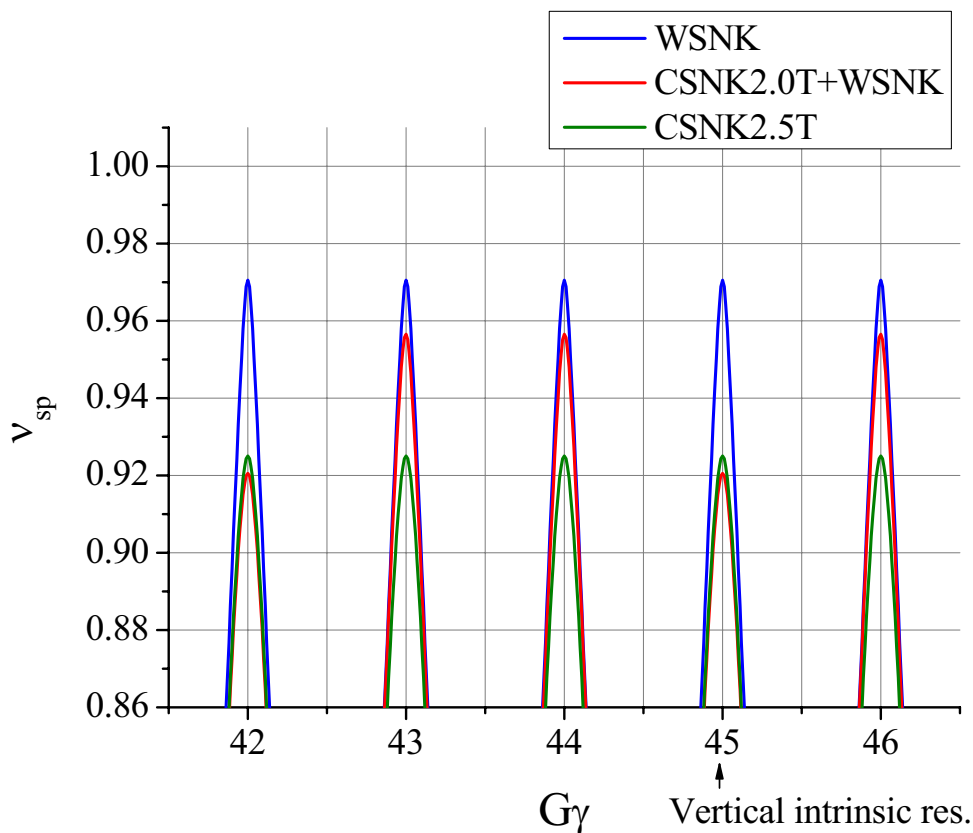


図 6-2-5 : シングルスネークとダブルスネークのスピントーン比較

このように、Warm Snake のみの場合ではスネーク強度が小さいためスピントーンギャップが小さいが、2.5T の Cold Snake を用いた場合ではスピントーンギャップが大きい。したがって、垂直方向のベータトロンチューンを 8.95 程度に調整することでベータトロンチューンが整数のときに生じるビームの共鳴でビームを失うことなく Vertical intrinsic resonance も乗り越えることが可能となる。図 6-2-5 において 2T の Cold Snake と Warm Snake を組み合わせたときのスピントーンギャップは  $G\gamma = 3n$  ( $n$  は整数) のとき大きくなっていることがわかる。これは Cold Snake と Warm Snake が AGS 加速器リングの 1/3 対称の位置に設置したためである。また Vertical intrinsic resonance の条件式は  $G\gamma = 12k \pm \nu_y$  ( $k$  は整数) であることから、加速器リングの 1/3 対称の位置に設置した Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転によるスピントーンギャップ

はちょうど Vertical intrinsic resonance の点で大きいギャップになり、より効果的に Vertical intrinsic resonance を乗り越えることが可能であることがわかる。

次に、Cold Snake と Warm Snake をリングの 1/6 対称の位置に設置した場合のスピントーンについて述べる。このときのスピントーンの式は

$$v_{sp} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \cos\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos(\pi G\gamma) - \sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{6} G\gamma\right) \right\} \quad (6-2-2)$$

となる。[6-21] 図 6-2-6 に Warm Snake のみの場合および Cold Snake と Warm Snake をリングの 1/3 対称の位置に設置した場合とのスピントーンの比較を示す。

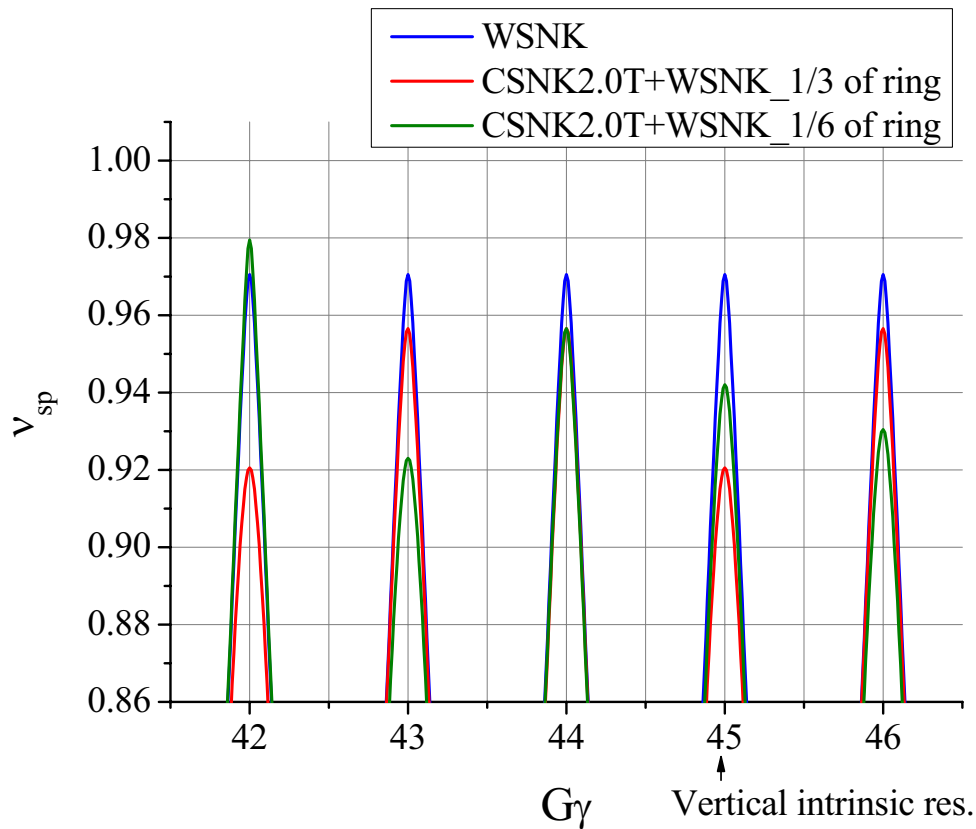


図 6-2-6 : 1/6 対称の位置に設置したときのスピントーン

このように、Cold Snake と Warm Snake をリングの 1/6 対称の位置に設置した場合、Vertical intrinsic resonance におけるスピントーンギャップが 1/3 対称の位置に設置した

場合と比較して小さくなっていることがわかる。また、 $G\gamma = 42$ のところでは Warm Snake 単体の運転よりもスピントーンギャップが小さくなってしまふ。したがって、リング 1/6 対称の位置に Cold Snake と Warm Snake を設置した場合、1/3 対称の位置に設置した場合と比べて非効果的であることがわかった。

同様にして Cold Snake と Warm Snake を 1/12 対称の位置に設置した場合、1/4 対称の場合および 1/2 対称の場合について検討した。式(6-2-3)は 1/12 対称の場合、式(6-2-4)は 1/4 対称の場合、式(6-2-5)は 1/2 対称の場合のスピントーンの式である。

$$v_{sp} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \cos\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos(\pi G\gamma) - \sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{12} G\gamma\right) \right\} \quad (6-2-3)$$

$$v_{sp} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \cos\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos(\pi G\gamma) - \sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} G\gamma\right) \right\} \quad (6-2-4)$$

$$v_{sp} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \cos\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos(\pi G\gamma) - \sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} G\gamma\right) \right\} \quad (6-2-5)$$

となる。各ケースのスピントーンのグラフを図 6-2-7 から図 6-2-9 に示す。

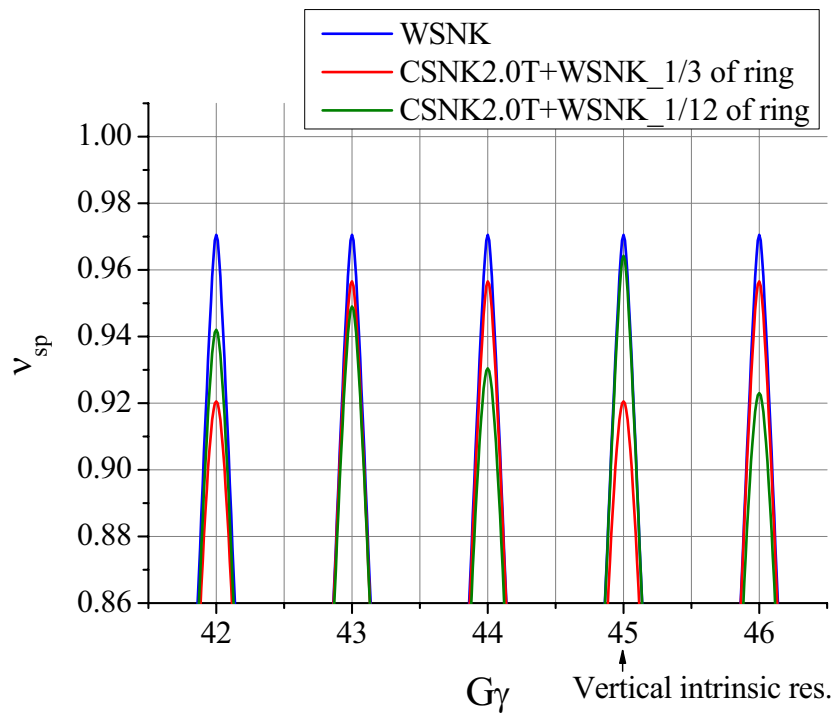


図 6-2-7 : 1/12 対称の位置に設置したときのスピントーン

このように、Cold Snake と Warm Snake をリングの 1/12 対称の位置に設置した場合、Vertical intrinsic resonance においてスピントーンギャップが Warm Snake 単体の場合とほぼ同じ程度のスピントーンギャップしかない。したがって、Cold Snake を Warm Snake からリングの 1/12 対称の位置に設置した場合、Vertical intrinsic resonance における Cold Snake の効果がほとんど無くなってしまふことがわかる。

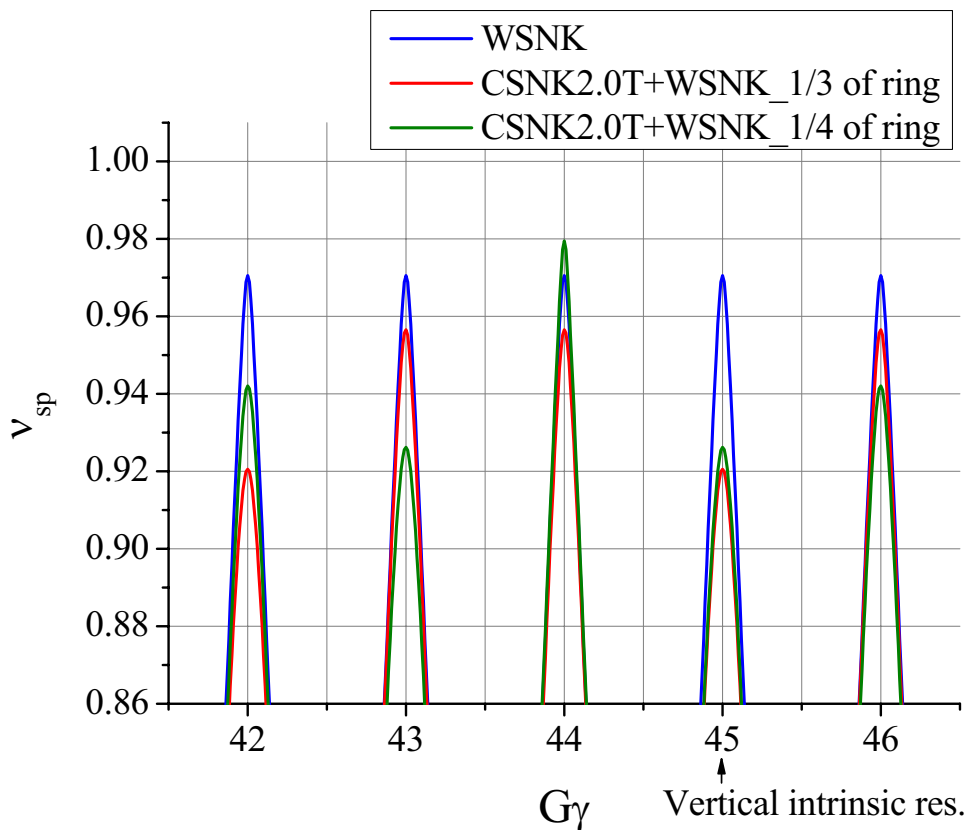


図 6-2-8 : 1/4 対称の位置に設置したときのスピントーン

Cold Snake を Warm Snake からリングの 1/4 対称の位置に設置した場合、Vertical intrinsic resonance におけるスピントーンギャップは Warm Snake 単体の場合に比べて大きい、1/3 対称の位置に設置した場合と比較するとギャップが小さいことがわかる。また、 $G\gamma = 44$  において 1/4 対称に設置したときのスピントーンギャップは Warm Snake 単体の場合に比べて小さいため、この点において Imperfection resonance に対し Cold Snake

は逆効果になってしまう。

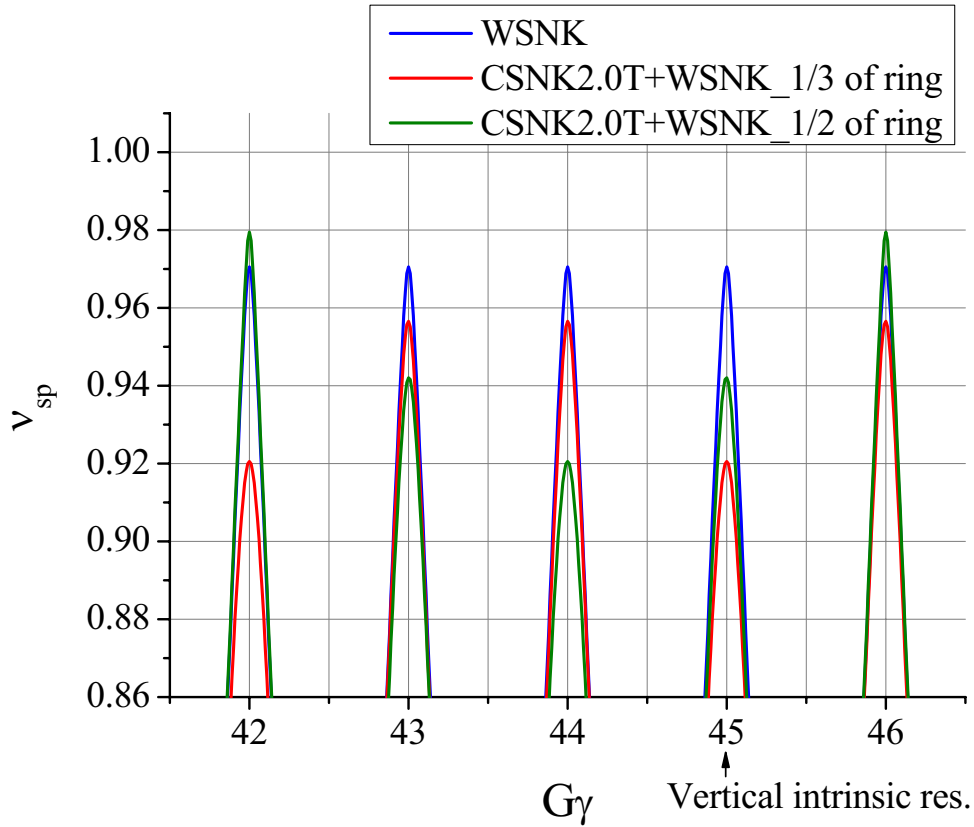


図 6-2-8 : 1/2 対称の位置に設置したときのスピントーン

Cold Snake を Warm Snake からリングの反対側に設置した場合、Vertical intrinsic resonance におけるスピントーンギャップは Warm Snake 単体の場合より大きいものの 1/3 対称の場合に比べて小さい。したがって、1/2 対称に設置した場合も Cold Snake の効果が薄れてしまう。またこのエネルギー範囲において  $G\gamma = 42$  および  $G\gamma = 46$  ではスピントーンギャップが Warm Snake 単体の場合よりも小さくなってしまうため、1/2 対称の位置に設置した場合、Cold Snake は Imperfection resonance に対し悪影響を及ぼしてしまうことがわかる。

以上の検討から、Cold Snake は Warm Snake の位置からリングの 1/3 対称の位置に設置することで最も効果的に Vertical intrinsic resonance および Imperfection resonance を乗

り越えることができる。したがって、Warm Snake は E20 に導入されているため、Cold Snake の設置場所の候補は A20 または I20 となる。

### 6-2-3 Double snake のスピンミスマッチ

偏極の向きを大きく変える Cold Snake を導入することによって AGS 加速器内の Spin Stable Direction は大きく変化する。一例として 2.5T の Cold Snake を A20 に設置し、単体で運転した場合の入射エネルギーおよび出射エネルギーにおける Spin Stable Direction のグラフを図 6-2-9 および図 6-2-10 に示す。

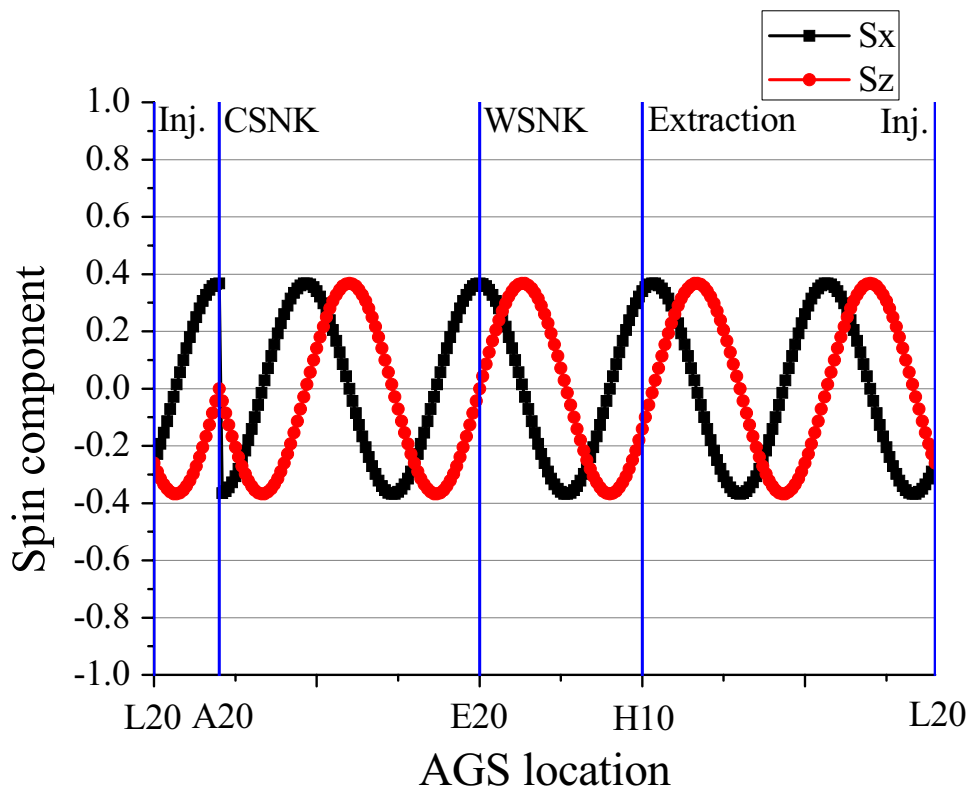


図 6-2-9 : 2.5T の Cold Snake のみを用いた場合の入射エネルギーにおける AGS 加速器内の SSD

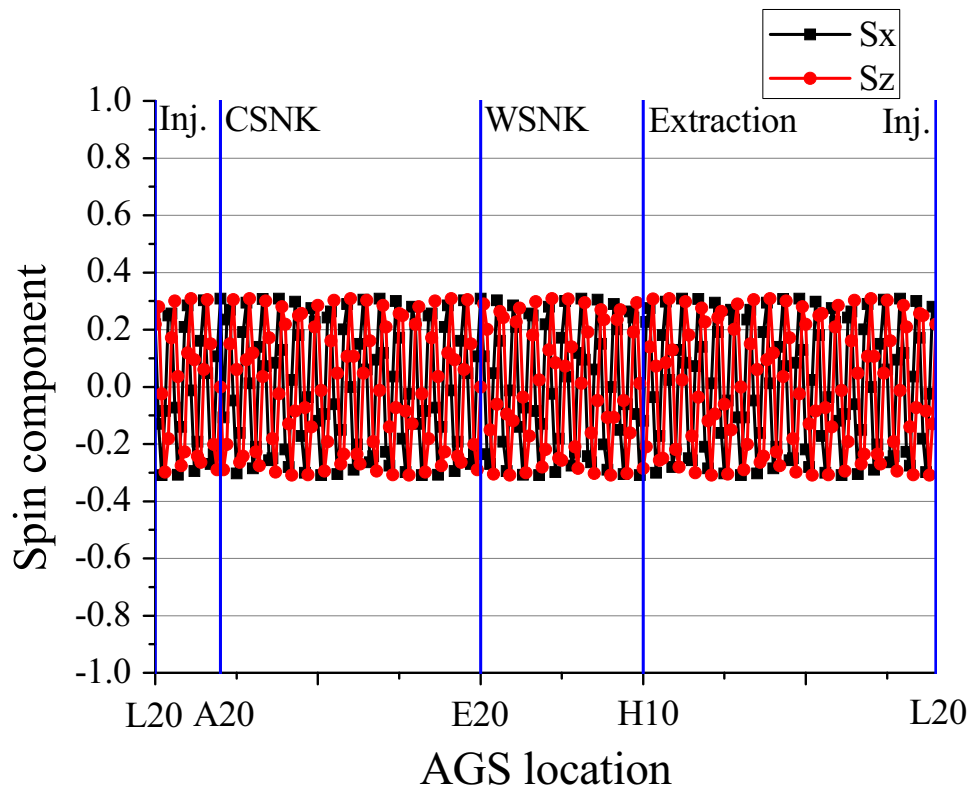


図 6-2-10 : 2.5T の Cold Snake のみを用いた場合の出射エネルギーにおける  
AGS 加速器内の SSD

ここで Warm Snake と 2.5T の Cold Snake をそれぞれ単体で運転した場合の垂直方向のスピンコンポーネントの比較を表 6-2-2 に示す。

表 6-2-2 : WSNK および 2.5T\_CS NK の垂直方向のスピンコンポーネント

	入射点	出射点
WSNK	0.9913	0.9957
2.5T_CS NK	0.9298	0.9511

このように 2.5T の Cold Snake を単体で運転した場合、AGS 加速器内の Stable Spin Direction の垂直スピンコンポーネントが小さくなってしまいます。入射偏極度が 80% のときこのスピンミスマッチによって偏極度は 74% になってしまいます。このことから、強い

Partial Siberian Snake は Vertical intrinsic resonance を避けるためには有効であるが、スピ  
ンミスマッチに関しては逆効果であることがわかる。ここで再びダブルスネーク運転法  
が有効な解決案となる。A20 に Cold Snake を設置し、2T の磁場強度で運転し、同時に  
Warm Snake を稼動した場合の AGS 加速器の入射エネルギーおよび出射エネルギーにお  
ける Spin Stable Direction を図 6-2-11 および図 6-2-12 に示す。

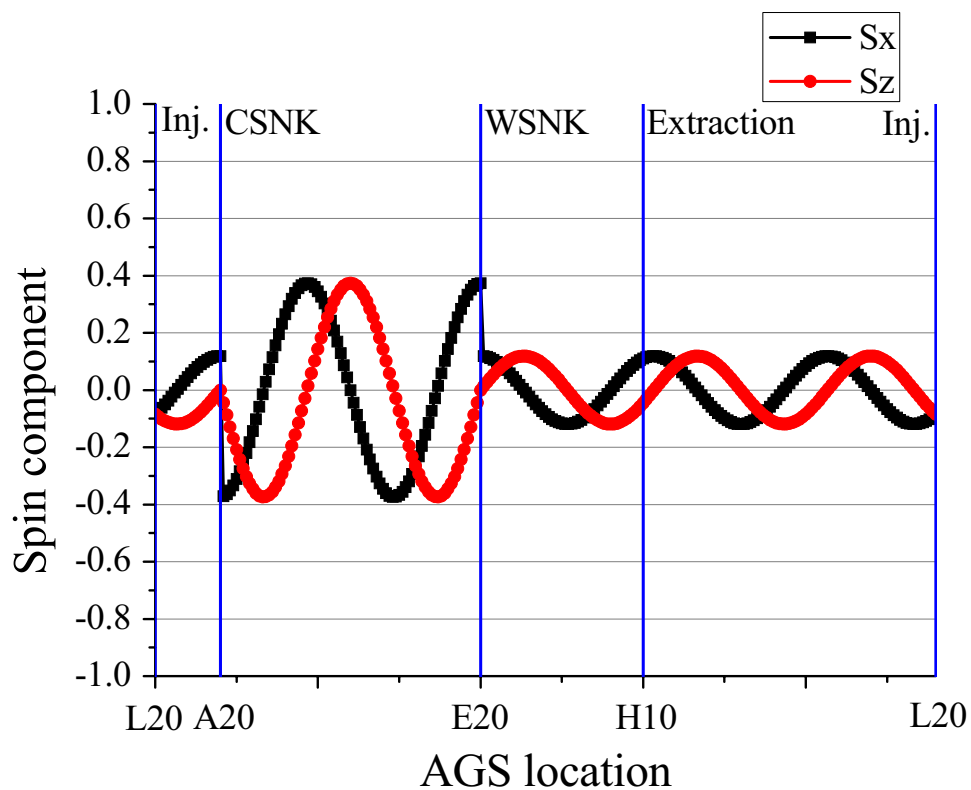


図 6-2-11 : 2T の Cold Snake と Warm Snake を組み合わせた場合の  
AGS 加速器の入射エネルギーにおける SSD

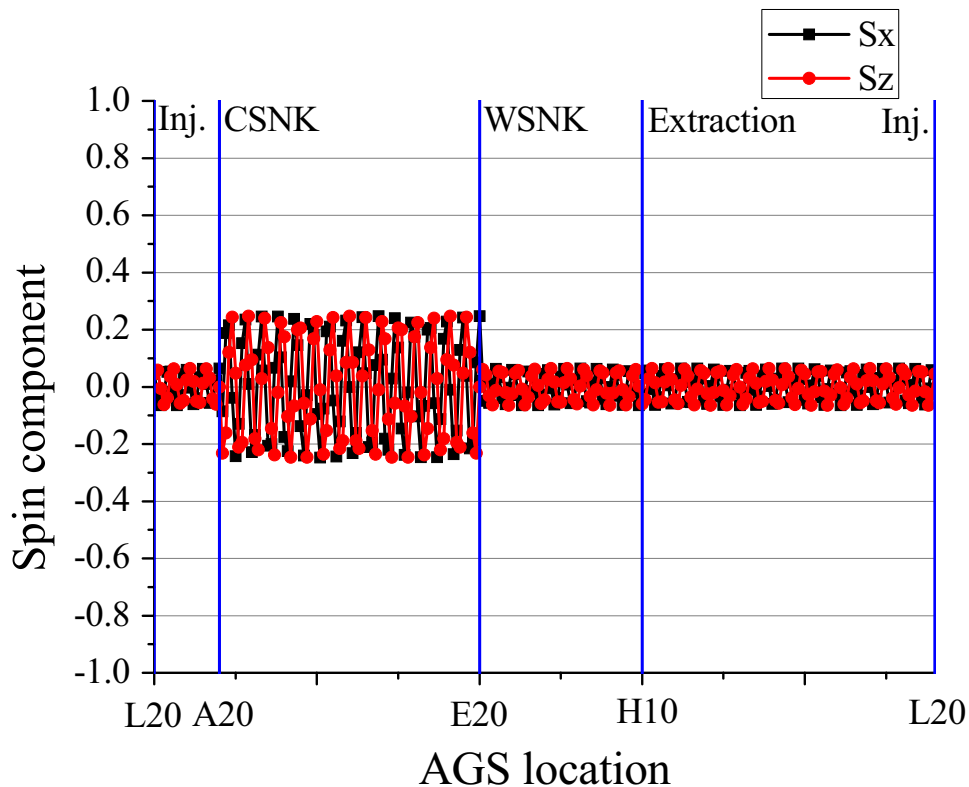


図 6-2-12 : 2T の Cold Snake と Warm Snake を組み合わせた場合の  
AGS 加速器の出射エネルギーにおける SSD

このように Cold Snake を A20 に設置し、Warm Snake と同時に稼動することで AGS 加速器の入口および出口におけるスピンミスマッチを小さくすることができる。ここでこれまでの運転パターンの計算で得られたスピンミスマッチを表 6-2-3 に示す。

表 6-2-3 : AGS 加速器の入射および出射におけるスピンミスマッチ

	入射点	出射点
WSNK	0.9913	0.9957
2.5T_CS NK	0.9298	0.9511
2T_CS NK@A20+WSNK	0.9929	0.9979

このように A20 に設置された Cold Snake を Warm Snake と同時に稼動することで、入射

および出射におけるスピンミスマッチは 2.5T の CSNK のみを稼動したときと比べ大幅に改善される。さらにこのダブルスネーク運転によって Warm Snake のみの運転よりもスピンミスマッチが小さくなることがわかる。

次に、もう一方の Cold Snake の設置候補である I20 に Cold Snake を設置した場合についてスピンミスマッチの考察を行う。

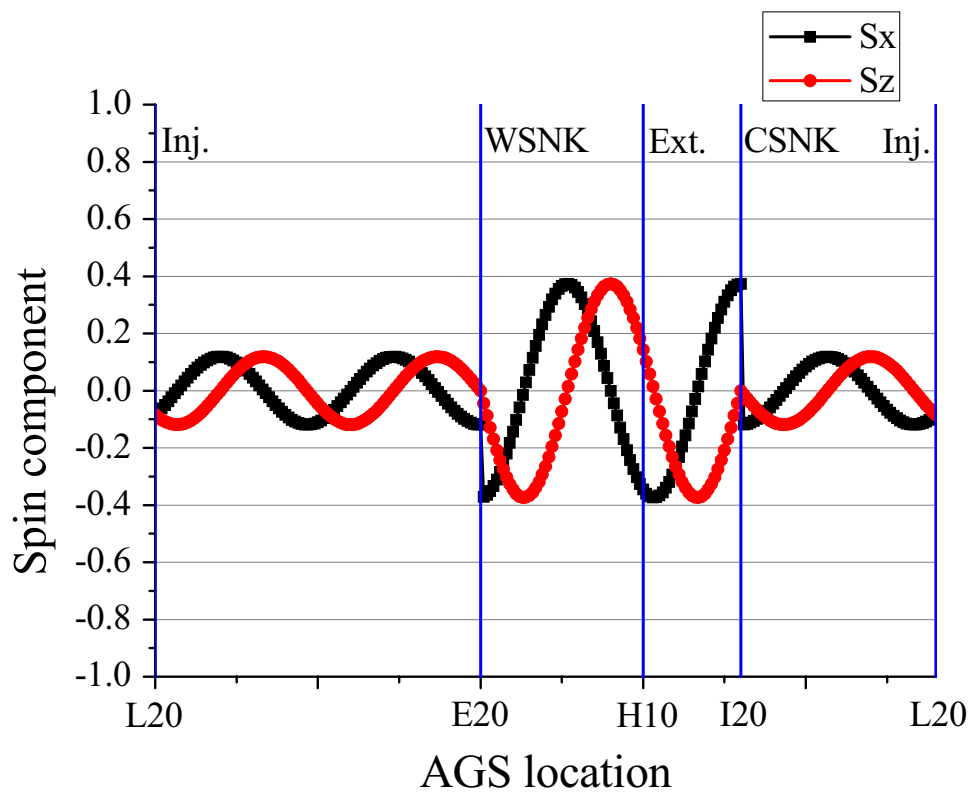


図 6-2-13 : 2T の Cold Snake を I20 に設置し Warm Snake と同時に稼動した場合の AGS 加速器の入射エネルギーにおける SSD

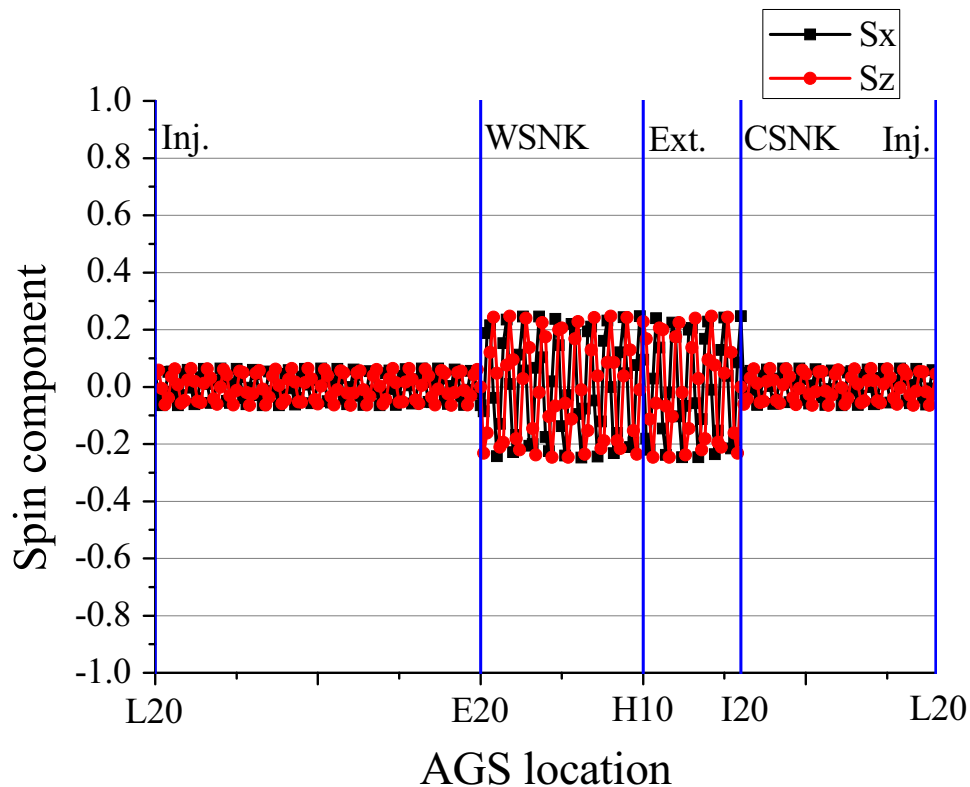


図 6-2-14 : 2T の Cold Snake を I20 に設置し Warm Snake と同時に稼動した場合の  
AGS 加速器の出射エネルギーにおける SSD

Cold Snake を I20 に設置した場合、図 6-2-13 より AGS 加速器の入射点である L20 におけるスピンミスマッチは Cold Snake を A20 に設置した場合と等しく、Cold Snake を単体で運転した場合に比べ、スピンミスマッチを大幅に低く抑えることができる。しかしながら、図 6-2-14 に示されているように  $S_x$  および  $S_z$  コンポーネントの振幅が E20 と I20 の間で大きくなってしまい、AGS 加速器の出射点である H10 におけるスピンミスマッチが大きくなってしまふ。表 6-2-4 に Warm Snake のみ、2.5T の Cold Snake のみ、Warm Snake と 2T の Cold Snake を A20 に設置した場合、Warm Snake と 2T の Cold Snake を I20 に設置した場合の入射点および出射点におけるスピンミスマッチの比較を示す。

表 6-2-4 : Cold Snake の位置の違いによるスピンミスマッチの比較

	入射点	出射点
WSNK	0.9913	0.9957
2.5T_CSNK	0.9298	0.9511
WSNK+2T_CSNK@A20	0.9929	0.9979
WSNK+2T_CSNK@I20	0.9929	0.9690

以上のスピントラッキングギャップとスピンミスマッチの検討から Cold Snake は図 6-2-15 のように Warm Snake から AGS 加速器リングの 1/3 対称であり、なおかつ入射点および出射点におけるスピンミスマッチを最小化することができる A20 に設置すると最も効果的であることがわかる。

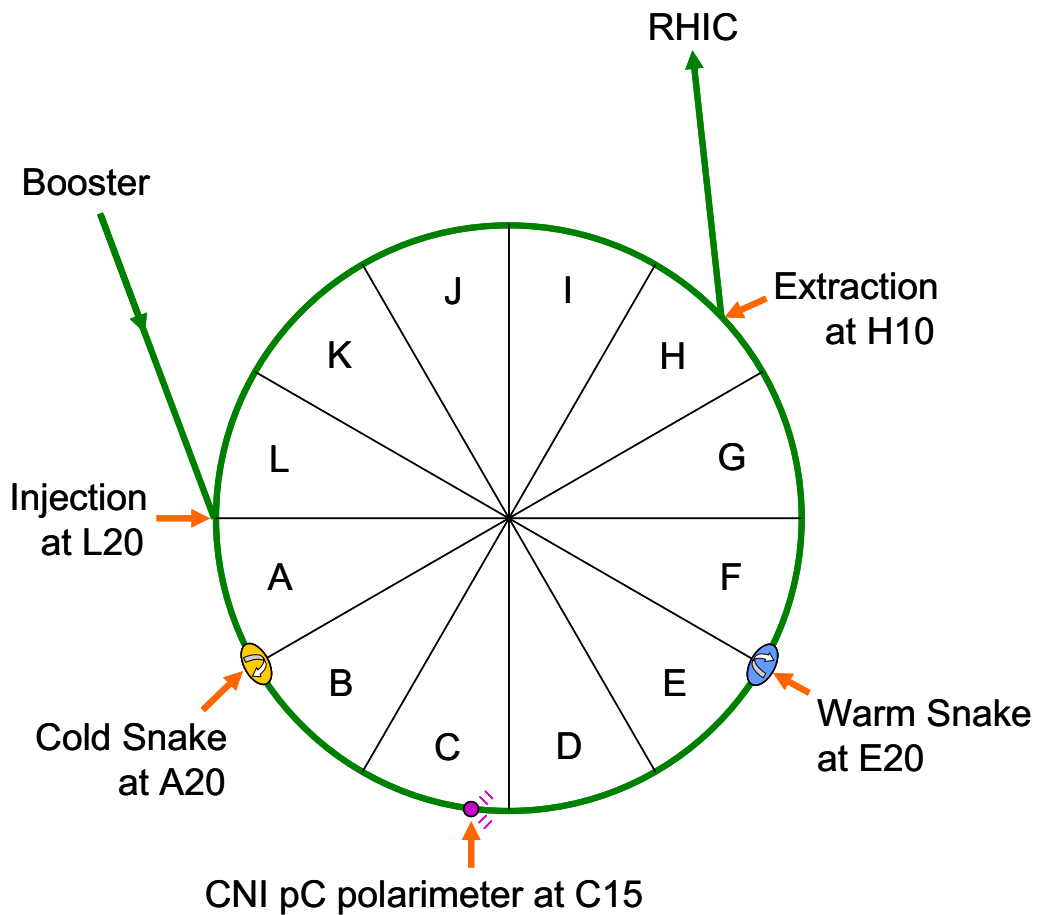


図 6-2-15 : 最適な Cold Snake の配置

## 6-3 2台の Partial Siberian Snake を用いた加速器実験

2005年の加速器運転ではAGS加速器ではWarm SnakeとRF dipoleの組み合わせ運転によってビーム強度  $1.0 \times 10^{11}$  protons/bunch で平均55%の偏極度を持つ偏極陽子ビームをRHIC加速器に供給した。[6-3] RHIC加速器へのビーム供給後、AGS加速器ではCold Snakeを用いた2つの運転パターンについて加速器試験を行った。1つは2TのCold SnakeとWarm Snakeを組み合わせた運転パターン。もう1つは2.5TのCold Snakeのみを用いた運転パターンである。前節で行ったダブルスネーク運転法の議論から、主にWarm Snakeと2TのCold Snakeの組み合わせ運転について加速器試験を行った。

はじめにCold Snakeの効果を調べるためWarm Snakeと2TのCold Snakeの組み合わせ運転において垂直方向のベータトロンチューンを変化させ、Vertical intrinsic resonanceを予定通り乗り越えることができるかについて測定を行った。その後、Vertical tuneを調整し、可能な限り高い偏極度を得られるようにAGS加速器を最適化した。[6-12] しかしながら、2005年の加速器実験においてはWarm Snakeと2TのCold Snakeの組み合わせ運転では出射エネルギーにおける偏極度が約50~55%であり、Warm SnakeとRF dipoleの組み合わせ運転の偏極度と比べやや低い結果となった。この結果の原因を調べるためそれぞれの運転パターンについて偏極度計を用いてビームエネルギーをランプアップさせながらRaw asymmetryの測定を行い、データの比較検討を行った。

スピンミスマッチによる偏極度への影響を調べるため、2.5TのCold Snakeのみを稼動させた場合のAGS加速器の入射エネルギーにおける偏極度の測定を行った。この測定結果を前節で行った計算結果と比較し検討を行った。

2006年の加速器実験ではRF dipoleを用いずにWarm Snakeと2TのCold Snakeを組み合わせた運転でRHIC加速器に偏極陽子ビームを供給することに平行してAGS加速器にて様々なテストを行った。本節ではこれらの実験結果を元に考察を行う。

### 6-3-1 Vertical tune scan

2005年にAGS加速器に導入されたCold Snakeが予定通り稼動していることを確認するため、Cold Snakeの中心磁場を2Tに設定し、Warm Snakeと組み合わせて運転したときの各Vertical intrinsic resonance  $G\gamma = 0 + \nu_y$ ,  $12 + \nu_y$ ,  $36 - \nu_y$ ,  $36 + \nu_y$ におけるAGS

加速器の垂直方向のベータトロンチューン (Vertical tune) と出射エネルギーにおける偏極度の依存性について測定を行った。

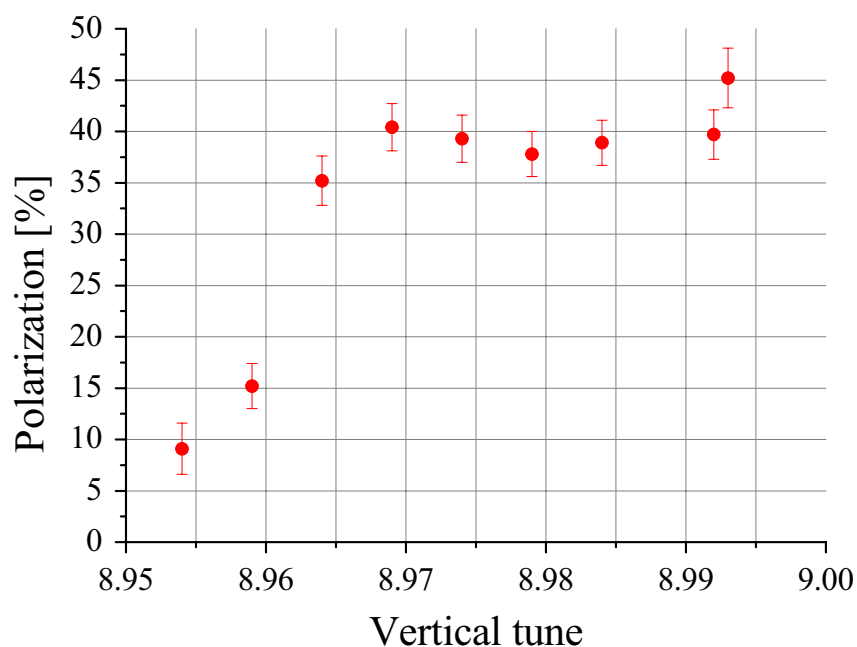


図 6-3-1 :  $G\gamma = 0 + \nu_y$  における Vertical tune scan

Warm Snake と 2T の Cold Snake の組み合わせ運転を行った場合、 $G\gamma = 0 + \nu_y$  におけるスピントチューンの計算値は  $\nu_{sp} = 0.911$  であるため、Vertical tune が 8.911 になるまで Vertical intrinsic resonance による減偏極効果は生じないはずである。しかしながら、図 6-3-1 のように Vertical tune=8.965 付近より偏極度が落ちてしまっていることがわかる。したがって、Cold Snake が本来の能力を発揮していない可能性がある。以下同様に  $G\gamma = 12 + \nu_y$ ,  $36 - \nu_y$ ,  $36 + \nu_y$  における Vertical tune scan を行った。

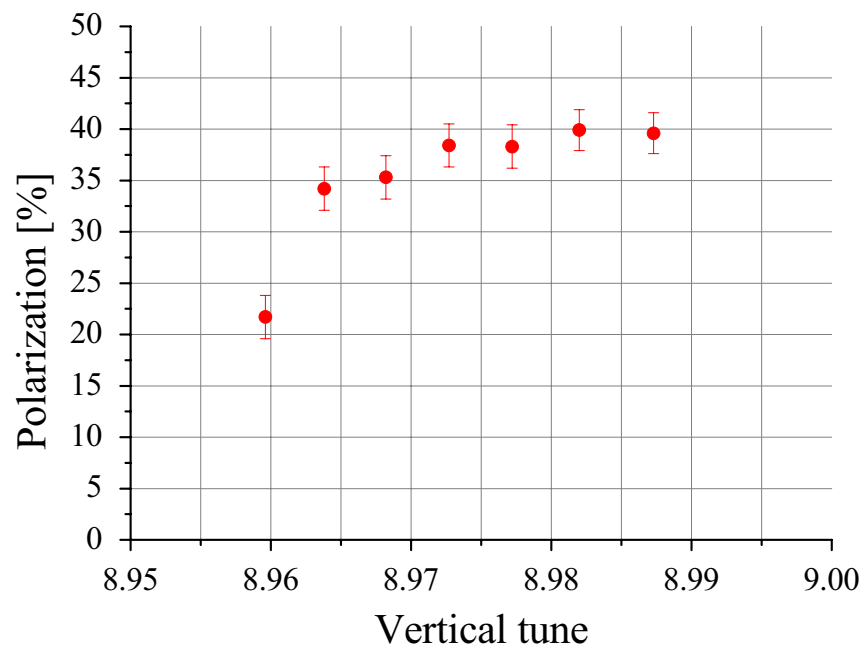


図 6-3-2 :  $G\gamma = 12 + \nu_y$  における Vertical tune scan

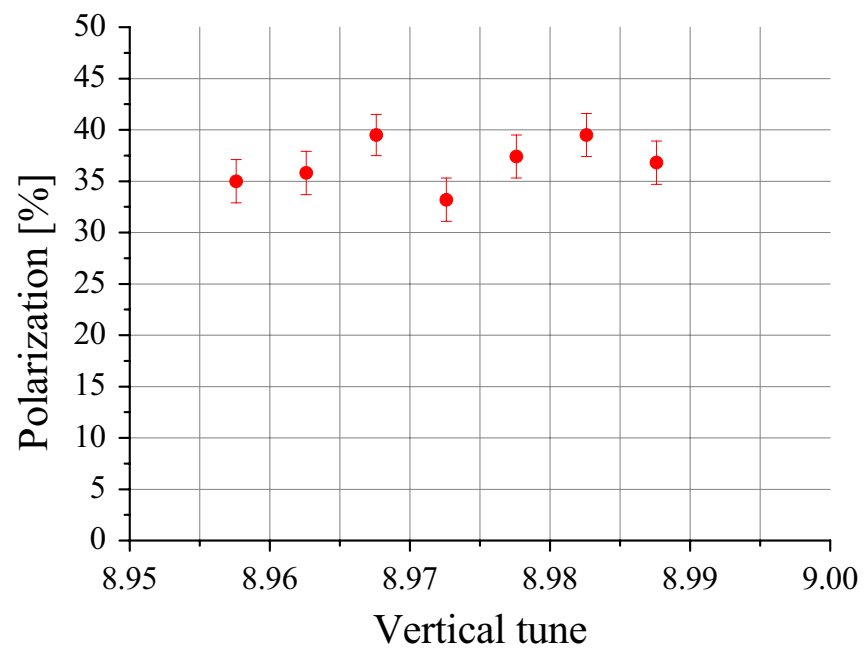


図 6-3-3 :  $G\gamma = 36 - \nu_y$  における Vertical tune scan

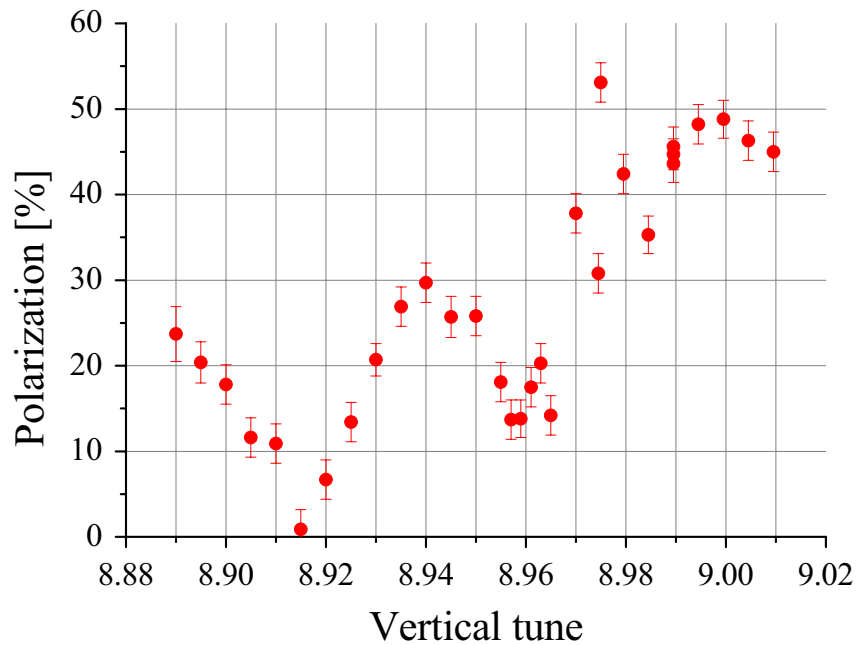


図 6-3-4 :  $G\gamma = 36 + \nu_y$  における Vertical tune scan

$G\gamma = 12 + \nu_y$  におけるスピントーンの計算値は  $\nu_{sp} = 0.919$  である。しかしながら、 $G\gamma = 0 + \nu_y$  と同様に推定値より早く偏極度が落ちてしまっている。したがって、この共鳴点においても Cold Snake が十分に働いていないため、スピントーンギャップが計算値より小さくなってしまっているものと考えられる。

$G\gamma = 36 - \nu_y$  における Vertical tune scan では  $G\gamma = 0 + \nu_y$  や  $G\gamma = 12 + \nu_y$  のときと異なり、Vertical tune=8.965 以下においても偏極度に極端な変化は観測されなかった。これは  $G\gamma = 36 - \nu_y$  における Vertical intrinsic resonance による減偏極効果が他の共鳴点と比較して弱いためであると考えられる。

$G\gamma = 36 + \nu_y$  におけるスピントーンの計算値は  $\nu_{sp} = 0.921$  であるが、図 6-3-4 に示されているように、Vertical tune が 8.97 付近より低いとき、偏極度が著しく低下している。この共鳴点においても 2T の Cold Snake によるスピントーンギャップが想定していたものより小さいことがわかる。

以上の各 Vertical intrinsic resonance における Vertical tune scan によって、偏極度の Vertical tune に対する依存性を確認した。この測定結果より、Vertical tune を 8.98 より高

くすることによって Vertical intrinsic resonance を乗り越え、より高い偏極度を得ることができるとわかる。このことからビームエネルギーをランプアップする際の Vertical tune を図 6-3-5 に示されているように 8.98 から 9.00 の間になるように設定した。グラフの横軸は AGS 加速器にビームを入射した後の経過時間であり、ビームエネルギーに比例する。グラフ中の青い縦線は各 Vertical intrinsic resonance の共鳴点である。

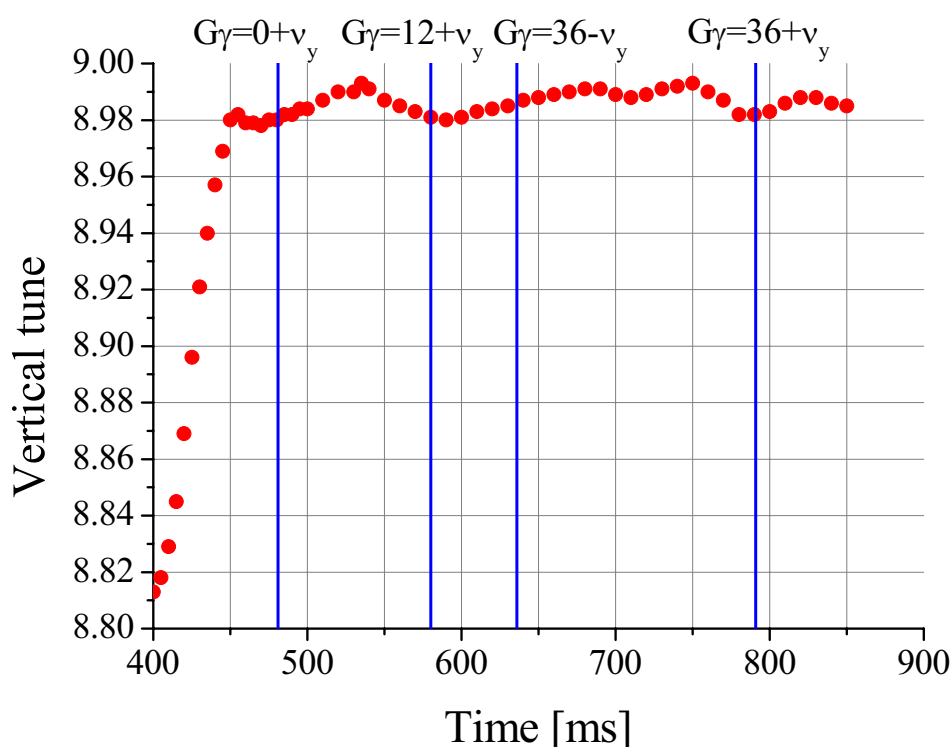


図 6-3-5 : ビームエネルギーをランプアップした際の Vertical tune の測定結果

### 6-3-2 スピンミスマッチの測定

次に 2.5T の Cold Snake のみを稼動し、Warm Snake を OFF にすることで入射エネルギーにおけるスピンミスマッチの測定を行った。まず、両方のスネーク電磁石を OFF にし、AGS 加速器内でビームを加速せずに偏極度計を用いて Raw asymmetry の測定を行った。その後、Cold Snake の中心磁場を 2.5T に設定し、新たに偏極陽子ビームを AGS 加速器に入射し、ビームを加速せずに Raw asymmetry の測定を行った。これらの測定結果を偏極度に変換し、前節で行ったスピンミスマッチの計算結果との比較を表 6-3-1 に

示す。

表 6-3-1：スピンミスマッチの測定結果と計算結果の比較

	CSNK_OFF	CSNK_ON	ON-OFF	(ON-OFF)/OFF
測定値	80.0%	75.2%	-4.8%	-6.0
計算値	80.0%	74.4%	-5.6%	-7.0

このように、スピンミスマッチの測定結果は計算値とほぼ同じ結果となった。このことから Warm Snake と 2T の Cold Snake を用いたダブルスネーク法におけるスピンミスマッチについても計算どおりにスピンミスマッチが小さくなっているものと考えられる。しかしながら、このダブルスネークの場合、スピンミスマッチによる偏極度の減少が小さいため、偏極度計のエラーの範囲内に入ってしまうことから計算結果との比較はできない。

### 6-3-3 2005 年におけるビームランプ時の Raw asymmetry の測定

Raw asymmetry の測定はまず RHIC 加速器にビームを供給する運転パターンである Warm Snake と RF dipole の組み合わせ運転で行った。その後、Warm Snake と 2T の Cold Snake の組み合わせ運転および 2.5T の Cold Snake のみの運転パターンで Raw asymmetry の測定を行った。図 6-3-6 に測定結果の前半部分、図 6-3-7 に後半部分のプロットを示す。

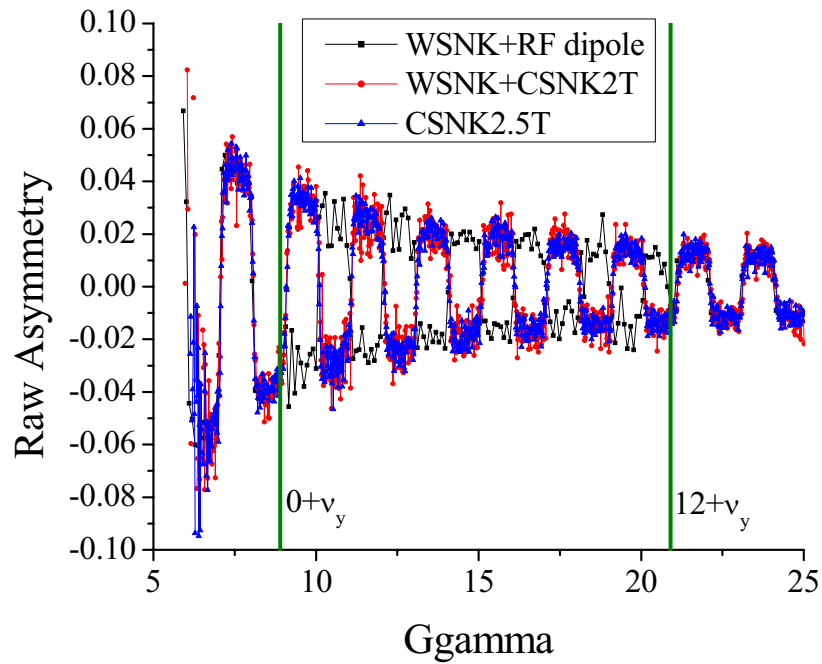


図 6-3-6 : Raw asymmetry のビームエネルギーランプ測定の前半

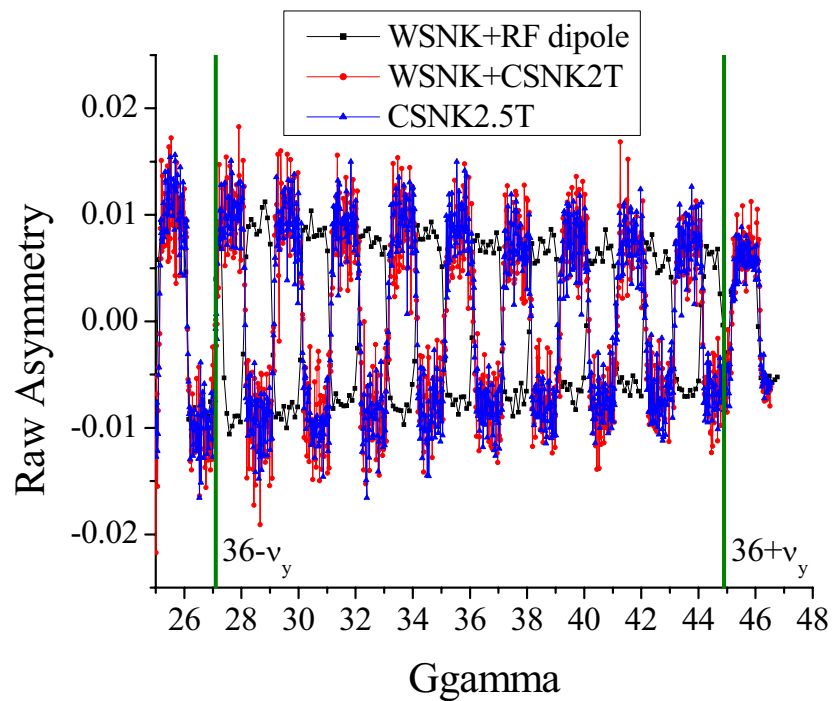


図 6-3-7 : Raw asymmetry のビームエネルギーランプ測定の後半

このようにそれぞれの運転パターンによる Raw asymmetry の極端な違いは観測されなかった。出射エネルギーにおける偏極度はいずれのケースにおいても約 55%であった。また、グラフから分かるように Warm Snake と RF dipole の組み合わせ運転の場合、各 Vertical intrinsic resonance において Raw asymmetry の振動の位相が反転していることがわかる。この 4 点の強い Vertical intrinsic resonance の前後における Raw asymmetry の測定値はそれぞれのケースを比較してもほぼ同等である。このことから Cold Snake と RF dipole は Vertical intrinsic resonance を乗り越える能力はほぼ同じであることが言える。

Cold Snake の RF dipole に対するアドバンテージは RF dipole では無視していた弱い Vertical intrinsic resonance ( $G\gamma = 24 - \nu_y, 24 + \nu_y, 48 - \nu_y$ ) による減偏極効果をも避けることができるという点である。しかしながら、いずれの共鳴点においても Cold Snake の場合と RF dipole の場合で差異は観測されなかった。すなわち、これらの弱い Vertical intrinsic resonance による減偏極効果は非常に小さいため、これらの共鳴点において Cold Snake を稼動することによる偏極度の向上は見込めないことを意味する。

#### 6-3-4 Double snake 運転時における偏極度のビーム強度依存性

2005 年に Warm Snake と RF dipole を用いて行った偏極度のビーム強度依存性の測定結果より、偏極度が強いビーム強度依存性を持つことがわかった。今回 Warm Snake と新たに導入された Cold Snake を用いた偏極度のビーム強度依存性について改めて測定を行った。この測定結果を 2005 年のものと比較したプロットを図 6-3-8 に示す。このときも 2005 年の測定と同様に偏極イオン源の Rb セルの温度を上げることでビーム強度を強くし、Chopper を用いることでビーム強度の調整を行った。

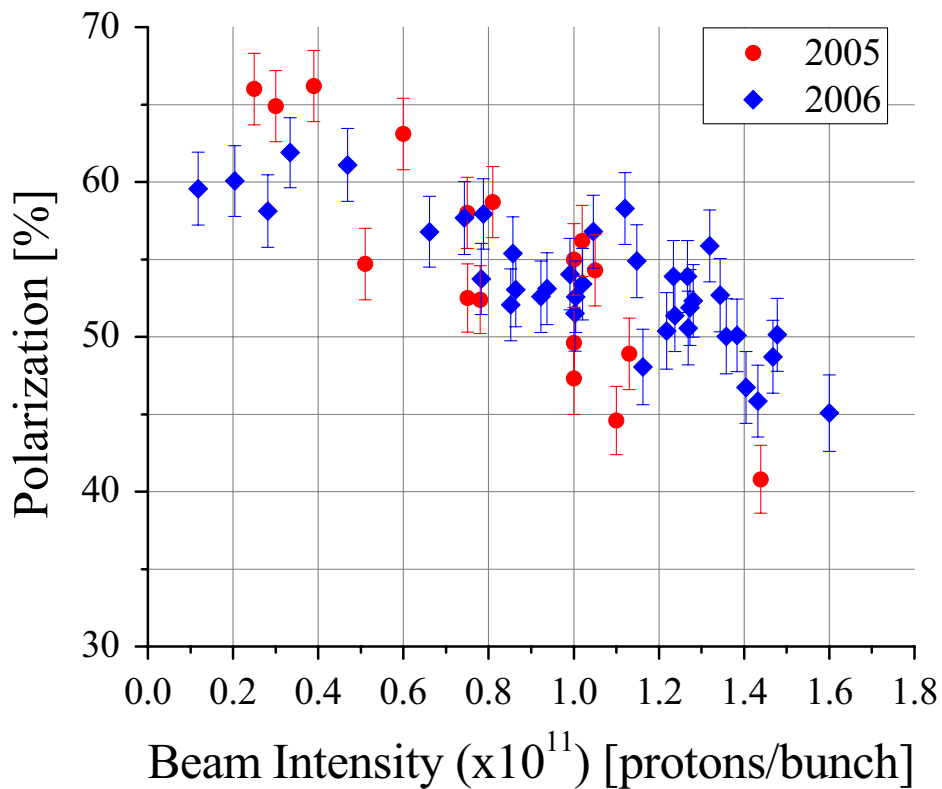


図 6-3-8 : ビーム強度依存性の比較

このように2006年の測定結果のほうが2005年に比べ偏極度のビーム強度依存性が弱くなっていることがわかる。これは Cold Snake の効果によるものと考えられる。その結果、RF dipole を用いた場合に比べ、より高いビーム強度でより高い偏極度を維持することができていることがわかる。しかしながら、依然として偏極度はビーム強度依存性を持っている。また、2005年の加速器実験より、エミッタンスもビーム強度の依存性があることがわかっている。この問題を解明するためビーム強度とエミッタンスの関係および偏極度とエミッタンスの関係について詳しい実験を行った。まずビーム強度が  $1.0 \times 10^{11}$  protons/bunch のときにビームを加速した際の AGS 加速器内におけるエミッタンス増大の測定を行った。

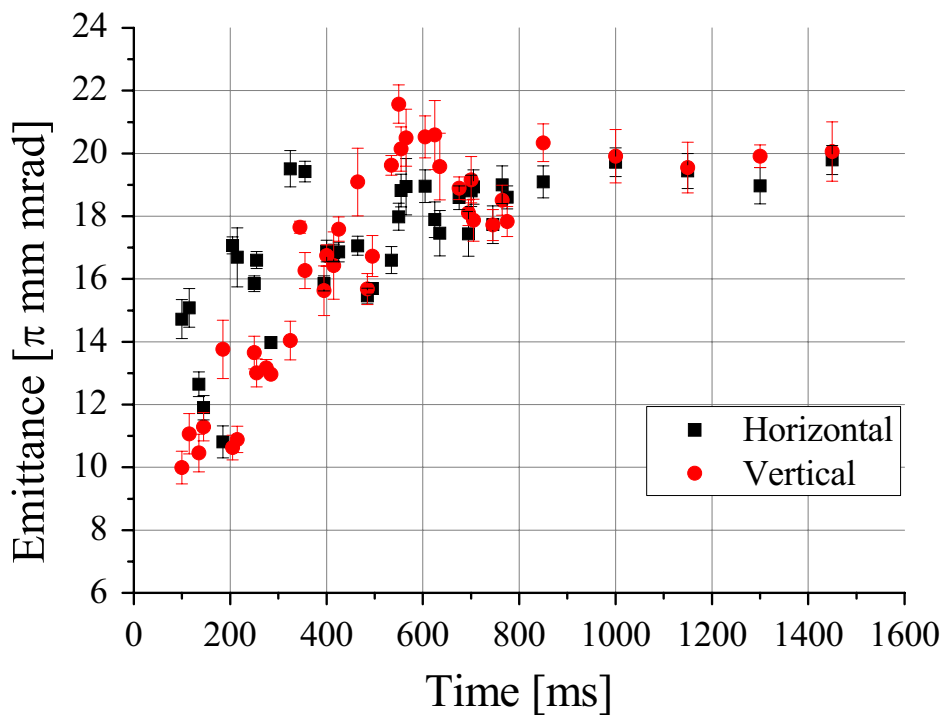


図 6-3-9 : ビーム加速中のエミッタンス増大

このようにビームを加速した際に水平方向および垂直方向のビームエミッタンスが増大していることがわかる。T=800ms 以降ではビームは加速されず、出射エネルギーで AGS 加速器内を周っているだけであり、この範囲ではエミッタンスの増大は観測されなかった。ここでグラフの横軸は AGS 加速器へのビーム入射後の時間であり、ビームエネルギーとほぼ比例している。この入射後の時間とビームエネルギーの相関関係を測定したグラフを図 6-3-10 に示す。

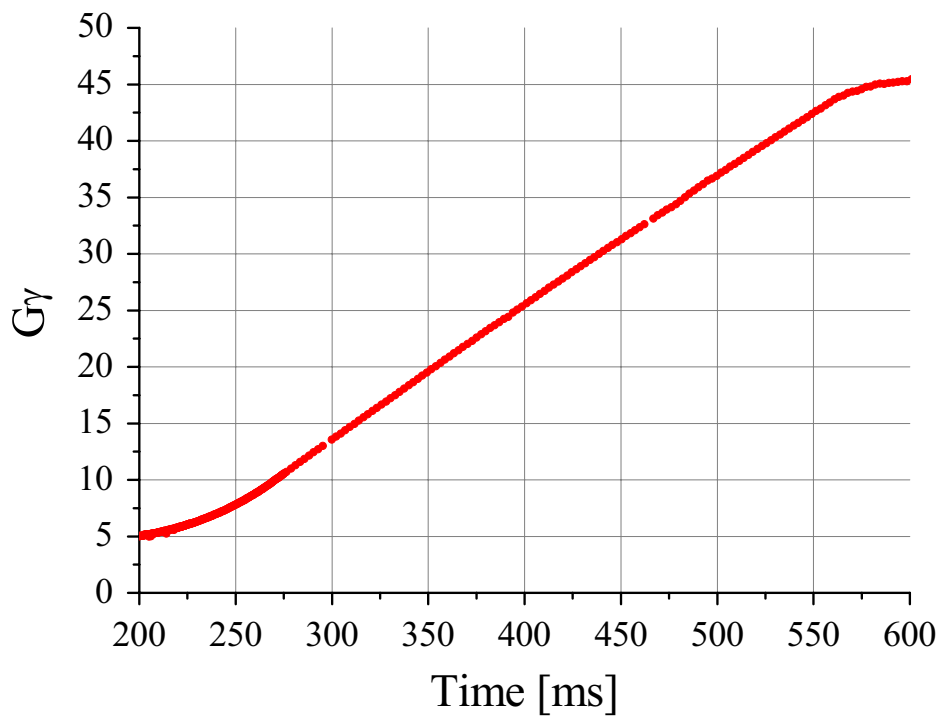


図 6-3-10 : ビームエネルギーとビーム入射後の時間の関係

この測定は AGS 加速器のメインダイポール電磁石の磁場とランプアップの時間を測定することで得られた。

次に  $T=100\text{ms}$ ,  $270\text{ms}$ ,  $440\text{ms}$ ,  $610\text{ms}$  におけるビームエミッタンスとビーム強度の相関を調べる測定を行った。図 6-3-11 から図 6-3-14 にそれぞれのグラフを示す。

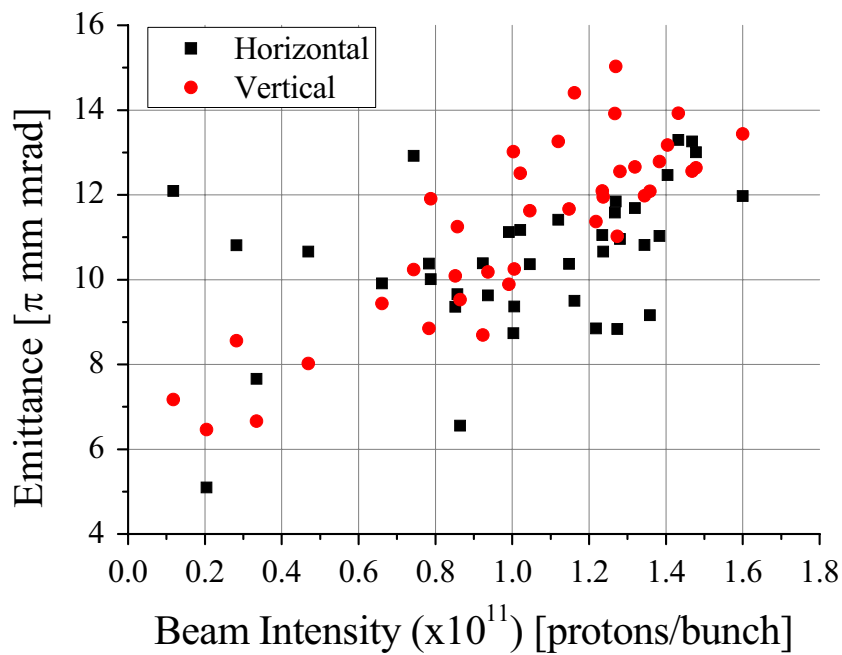


図 6-3-11 : T=100ms におけるエミッタンスのビーム強度依存性

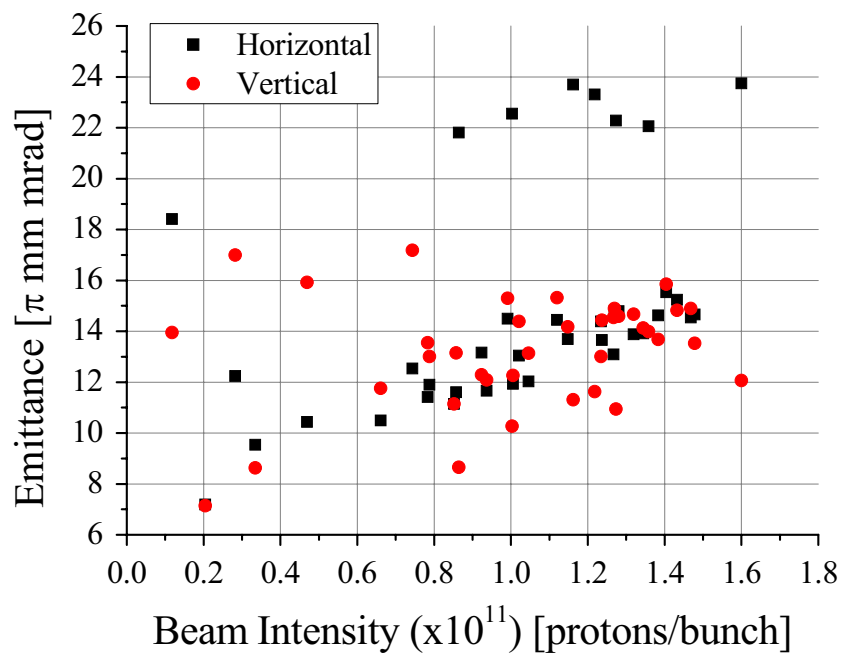


図 6-3-12 : T=270ms におけるエミッタンスのビーム強度依存性

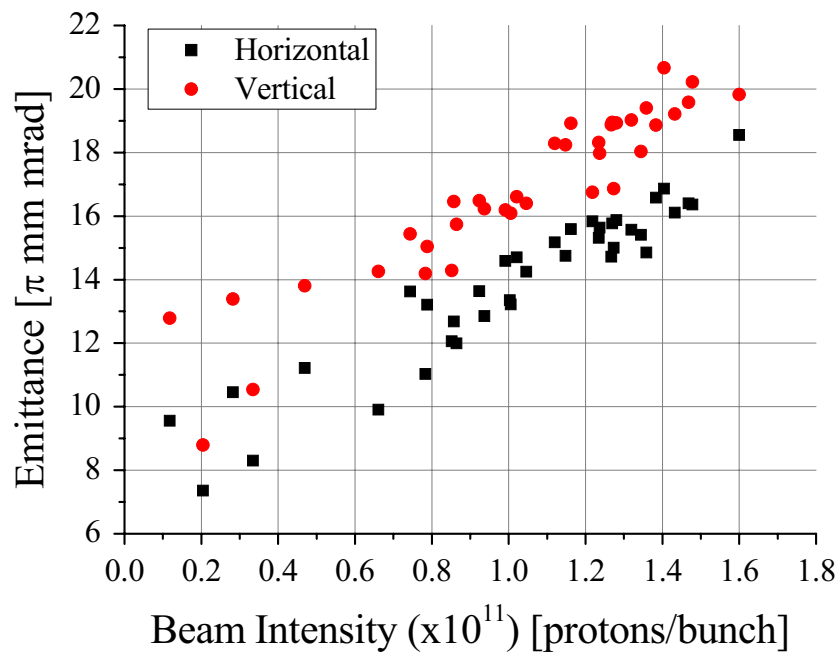


図 6-3-13 : T=440ms におけるエミッタンスのビーム強度依存性

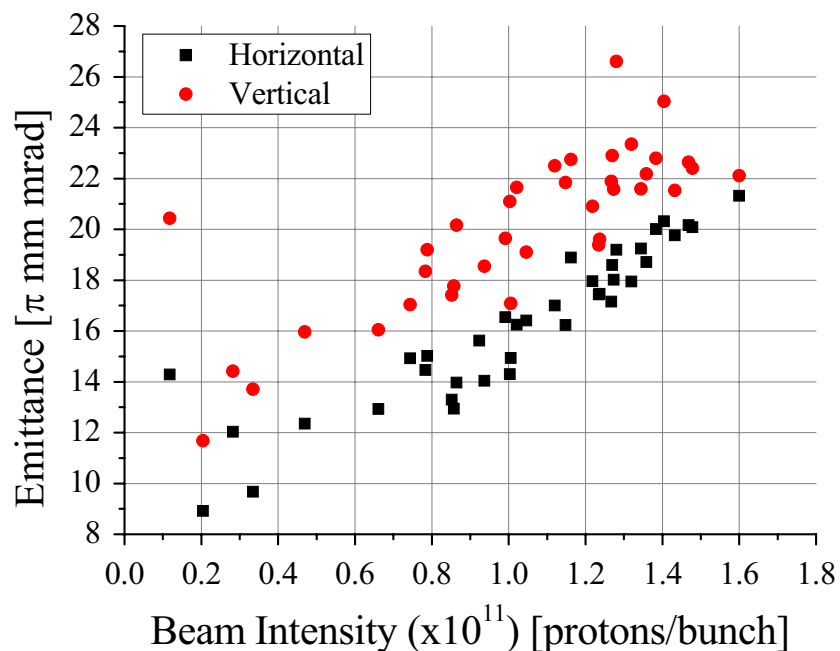


図 6-3-14 : T=610ms におけるエミッタンスのビーム強度依存性

以上のようにビーム強度が増えるとエミッタンスも増えることがわかる。特に  $T=440\text{ms}$ ,  $610\text{ms}$  ではその傾向が著しい。この測定結果より、偏極度はビーム強度ではなくエミッタンスに対して依存性がある可能性が考えられる。したがってエミッタンスをより小さくすることでより高い偏極度を得られるものと考えられる。また小さいエミッタンスを維持したまま高いビーム強度を得ることができれば、目標の高偏極度・高強度の偏極陽子ビームを RHIC 加速器に供給することが可能となる。まず、偏極度のエミッタンスに対する依存性を示すプロットを図 6-3-15 から図 6-3-18 に示す。

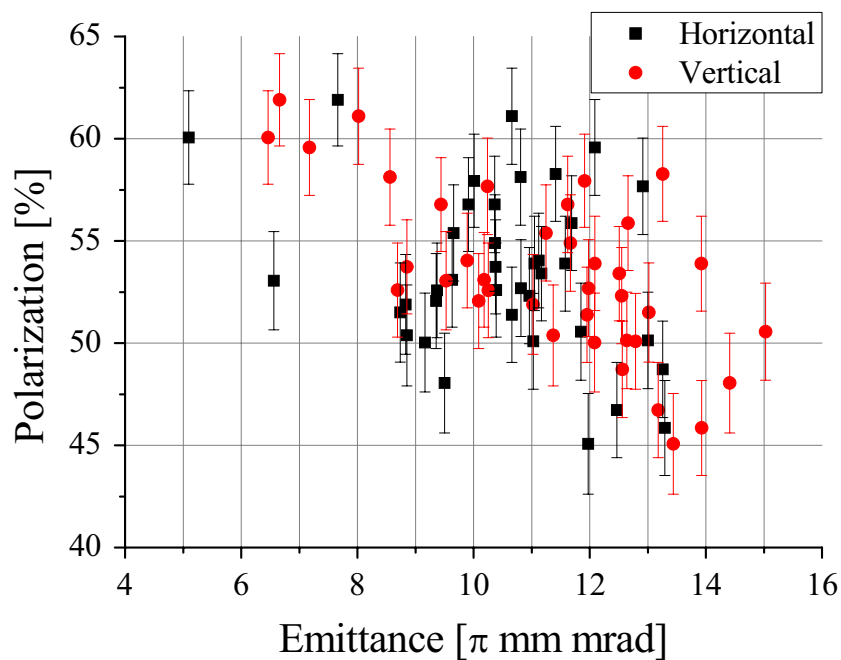


図 6-3-15 :  $T=100\text{ms}$  における偏極度のエミッタンス強度依存性

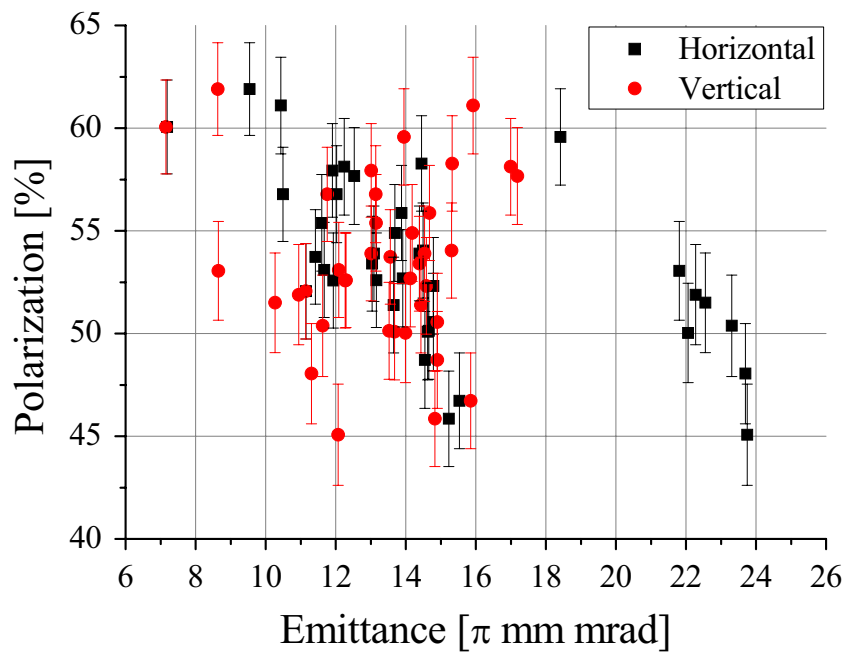


図 6-3-16 :  $T=270$ ms における偏極度のエミッタンス強度依存性

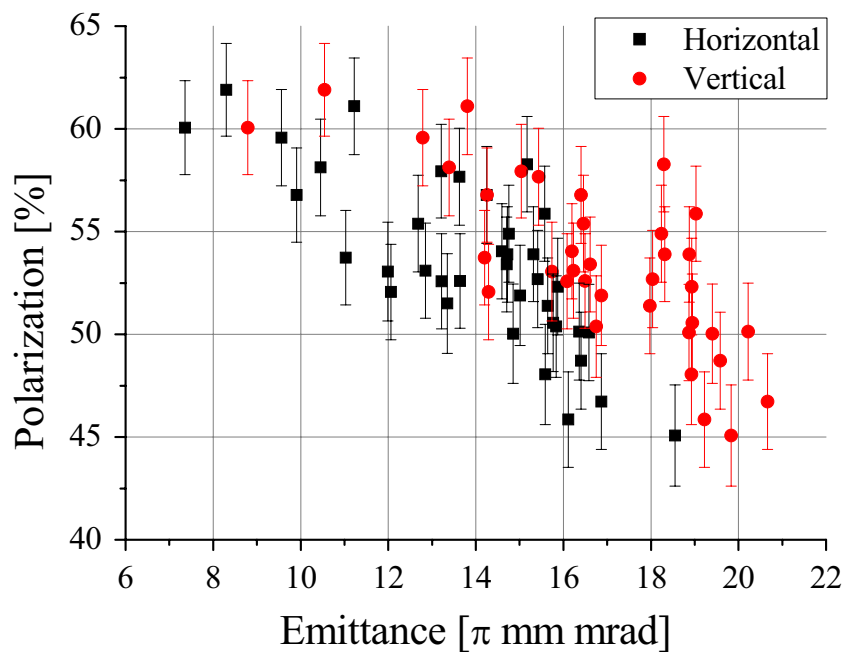


図 6-3-17 :  $T=440$ ms における偏極度のエミッタンス強度依存性

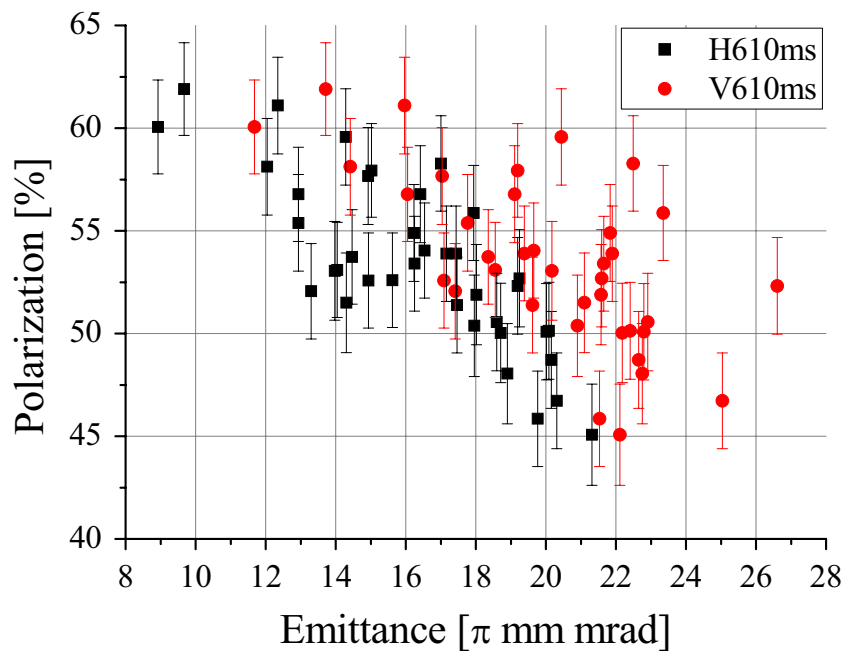


図 6-3-18 : T=610ms における偏極度のエミッタンス強度依存性

エミッタンスはビーム強度に対してほぼ比例の関係であるため、図 6-3-15 から図 6-3-18 に示されているように偏極度はビームエミッタンスに対し依存性を示す。

次にビーム強度を一定にし、チューンメーターのビームキッカーを用いることで意図的にエミッタンスを大きくし、偏極度に対する影響を測定した。ビームキッカーは Transition energy を越えた後の T=350ms で稼動するように設定した。まず垂直方向のビームキッカーの電圧を 0kV, 5kV, 10kV, 15kV に設定し、それぞれのエミッタンスおよび偏極度の測定を行った。垂直方向のビームキッカー電圧による垂直方向のエミッタンス増大の測定結果を図 6-3-19 に、偏極度の変化を図 6-3-20 に示す。

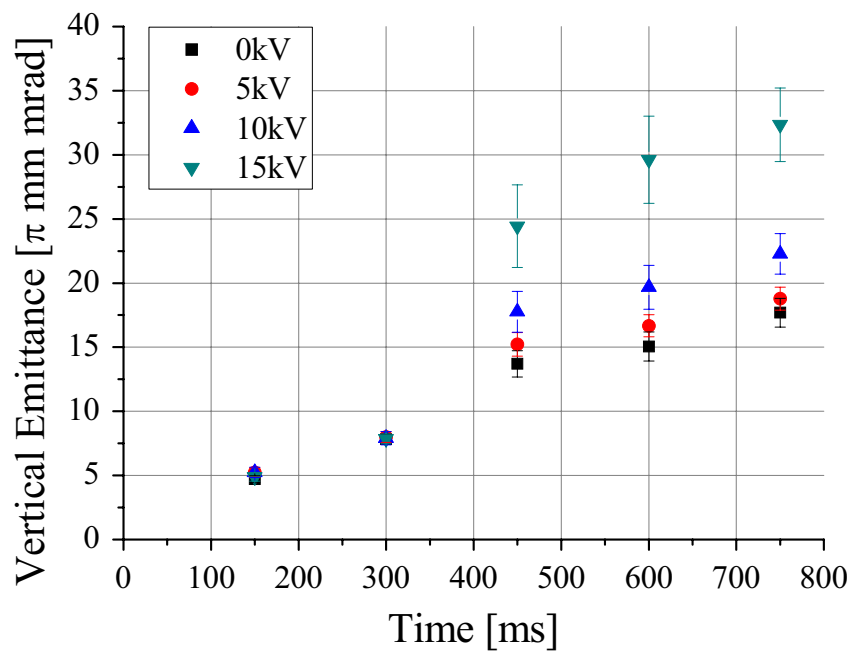


図 6-3-19 : 垂直方向のエミッタンス増大とキッカー電圧の関係

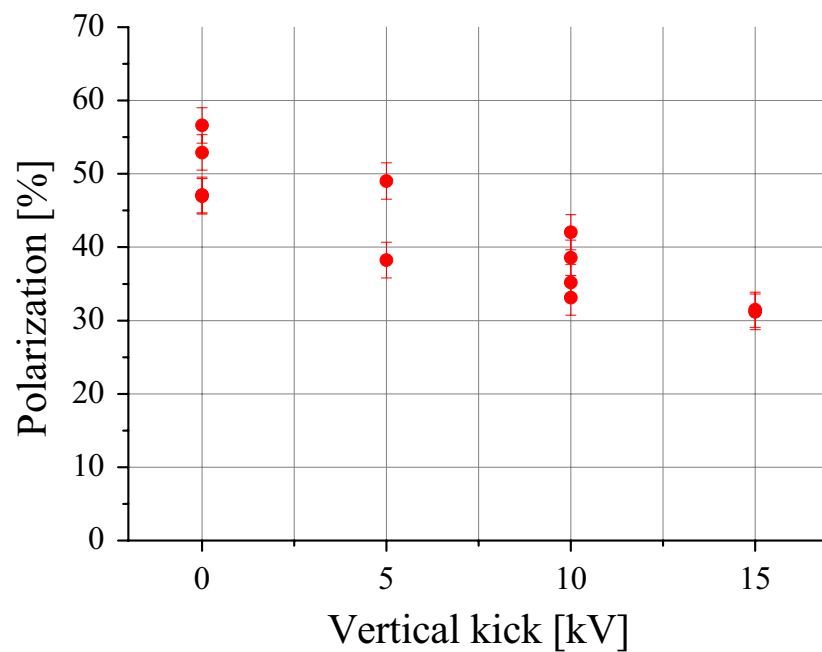


図 6-3-20 : 偏極度のキッカー電圧依存性

図 6-3-19 に示されているように、垂直方向のビームキッカーの電圧を高くすることで垂直方向のエミッタンスを大きくすることができることがわかる。このビームキッカーによるエミッタンスの増大によって偏極度は下がるはずである。その測定結果が図 6-3-20 である。このグラフに示されているように、偏極度はビームキッカーの電圧に対し比例的に下がっていることがわかる。この実験を通して偏極度はビーム強度ではなくエミッタンスに対して依存性があるということが示すことができた。水平方向のビームキッカーを用いた実験ではキッカー電圧を 3kV にてビームが消滅してしまったため、この実験を行うことはできなかった。

以上のビームエミッタンスに関する実験より、AGS 加速器に供給されるビームのサイズを小さくし、エミッタンスを低くすることが偏極度の向上に対して有効であることがわかった。この結果より、Booster 加速器内において Horizontal Scraper および Vertical Scraper を用いることで AGS 加速器に供給するビームサイズおよびビーム強度の調整を行った。これは AGS 加速器の入射エネルギーにおけるビームサイズを小さくすることで、ビーム加速中のエミッタンス増大の初期値を小さく抑えることが目的である。以下に T=100ms および T=500ms におけるエミッタンスとビーム強度の関係、ビーム加速中のエミッタンスの増大、偏極度のビーム強度依存性についての測定結果を示す。

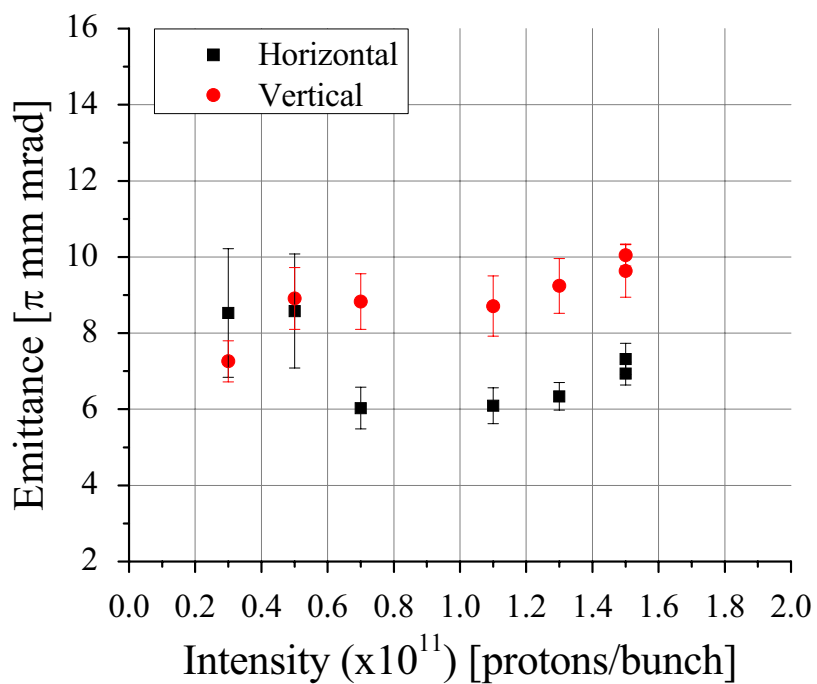


図 6-3-21 : Hori. Scraper を用いたときの T=100ms におけるエミッタンスとビーム強度

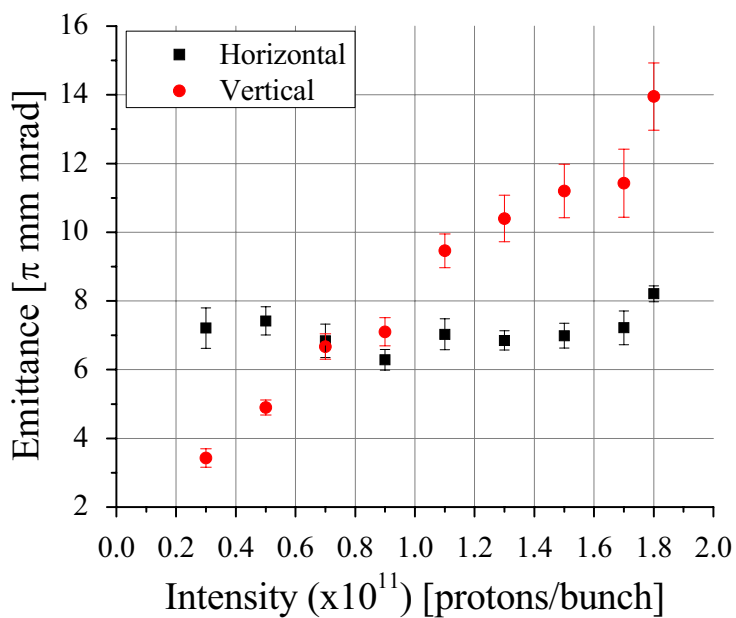


図 6-3-22 : Vert. Scraper を用いたときの T=100ms におけるエミッタンスとビーム強度

図 6-3-21 に示されているように、Horizontal Scraper を用いた場合、T=100ms すなわち AGS 加速器へのビームの入射直後かつビームを加速する直前における水平および垂直方向のエミッタンスはビーム強度に対する依存性が少ない。また、図 6-3-22 に示されているように Vertical Scraper を用いた場合、水平方向のエミッタンスはビーム強度に対して依存性は少ないが、垂直方向のエミッタンスはビーム強度に対する依存性が強いことがわかる。以上のことから AGS 加速器入射エネルギーにおいて、Vertical Scraper のみが垂直方向のエミッタンスを小さくする効果があり、残りの 3 つのケースではエミッタンスに対し影響が無いことがわかった。この結果から AGS 加速器へ供給するビームサイズに関しては Vertical Scraper のみが有効であると言える。

次に AGS 加速器の Transition energy を超えた T=500ms において Booster 加速器内の Horizontal Scraper と Vertical Scraper を用いたときの水平および垂直方向のエミッタンスとビーム強度の測定を行った。

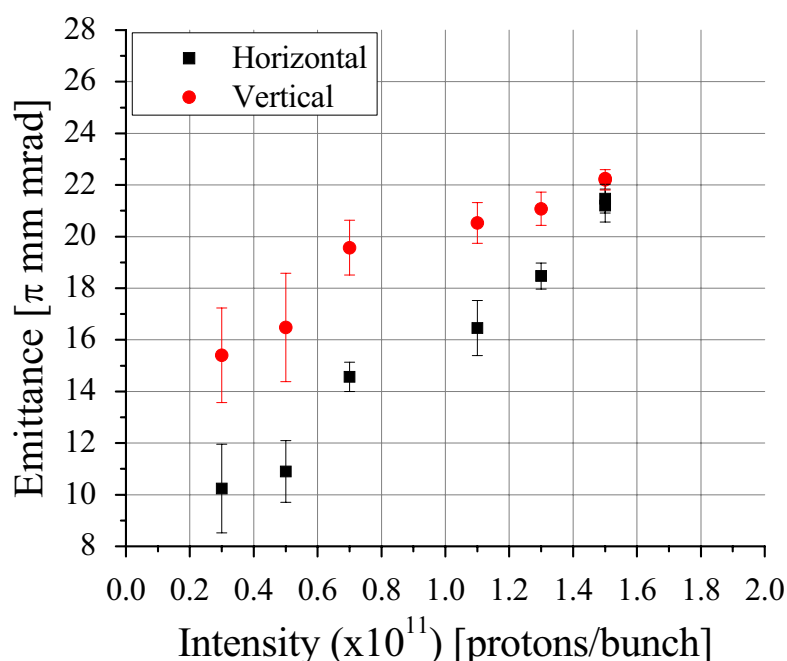


図 6-3-23 : Hori. Scraper を用いたときの T=500ms におけるエミッタンスとビーム強度

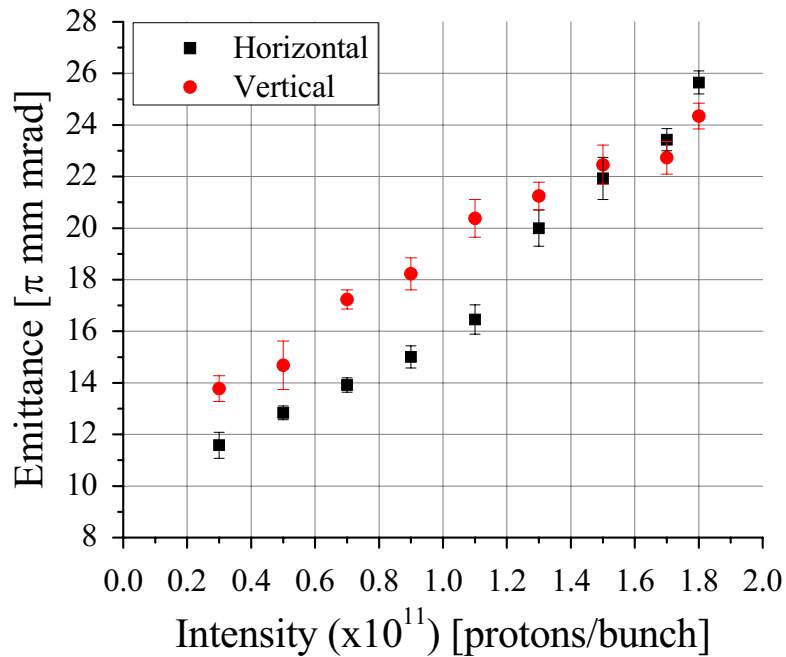


図 6-3-24 : Vert. Scraper を用いたときの T=500ms におけるエミッタンスとビーム強度

このように、T=500ms における水平および垂直方向のエミッタンスは Horizontal Scraper および Vertical Scraper のいずれを用いた場合でもビーム強度に対して依存性がある。

T=100ms と T=500ms の比較から、Booster 加速器内の Horizontal Scraper および Vertical Scraper を用いた場合においても水平および垂直方向のエミッタンスは AGS 加速器中でビームを加速することでエミッタンスが増大していることがわかる。

次に Chopper、Horizontal Scraper および Vertical Scraper を用いた場合の水平および垂直方向のエミッタンスの増大についての比較を行った。図 6-3-25 に水平方向のエミッタンスについて、図 6-3-26 に垂直方向のエミッタンスについてのプロットを示す。

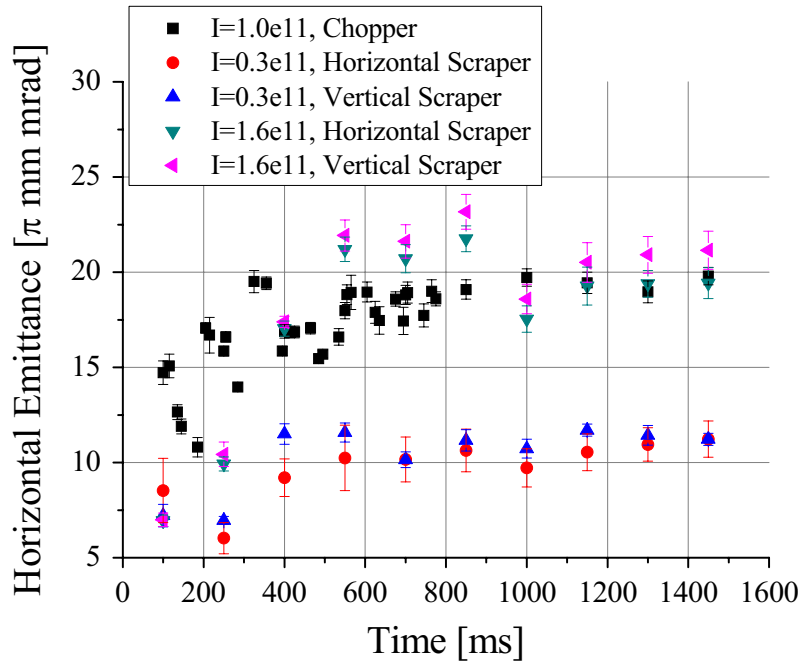


図 6-3-25 : 水平方向のエミッタンスの増大

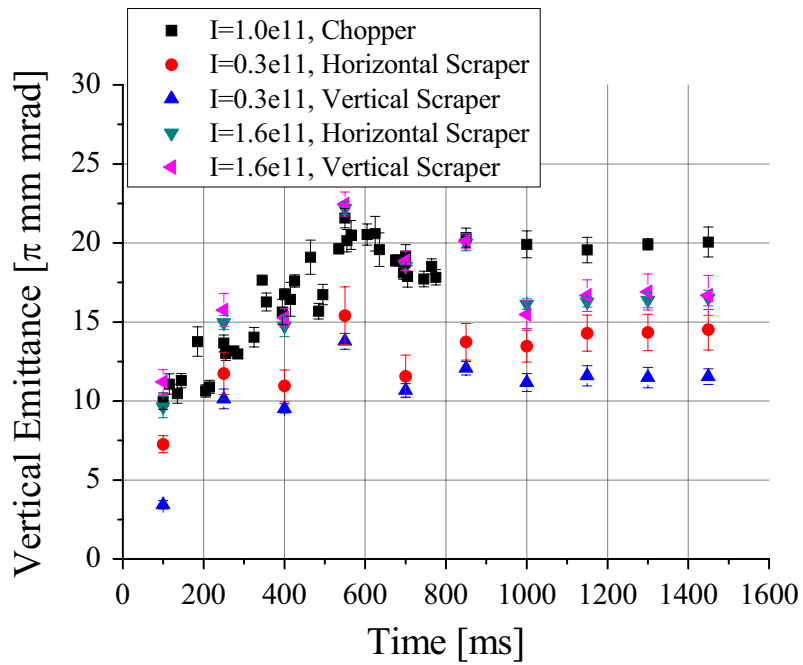


図 6-3-26 : 垂直方向のエミッタンスの増大

図 6-3-25 に示されているように、Horizontal Scraper および Vertical Scraper を用いることによって水平方向のエミッタンス増大を低く抑えることが可能である。ビーム強度が  $1.6 \times 10^{11}$  protons/bunch の場合においてもビーム入射時のエミッタンスが小さいため出射エネルギーにおけるエミッタンスは Chopper を用いたときのビーム強度  $1.0 \times 10^{11}$  protons/bunch と同程度のエミッタンスとなる。また、垂直方向のエミッタンスに関しては図 6-3-26 に示されているように Chopper、Horizontal Scraper および Vertical Scraper のいずれのケースにおいてもビームの加速中にエミッタンスが増大していることがわかる。ただし、Scraper の強度を強め、ビームサイズを小さくした場合、加速中および加速後のビームエミッタンスは Chopper を用いた場合より全体的に小さくなっている。また、Scraper を用いてビーム強度を  $1.6 \times 10^{11}$  protons/bunch にして測定した加速中のエミッタンスは Chopper を用いてビーム強度を  $1.0 \times 10^{11}$  protons/bunch にした場合と同程度であった。すなわち、同じエミッタンスでより高いビーム強度を得られるため、Scraper を用いた場合、高い偏極度を維持したままビーム強度を上げることができると考えられる。この測定結果と考察を元に Vertical Scraper を用いてビーム強度を調整したときの偏極度のビーム強度依存性について測定を行った。この測定結果は 2005 年の Warm Snake と RF dipole の組み合わせ運転時の測定結果および 2006 年の Warm Snake と 2T の Cold Snake の組み合わせ運転時に Chopper でビーム強度を調整した偏極度の測定結果との比較を行った。

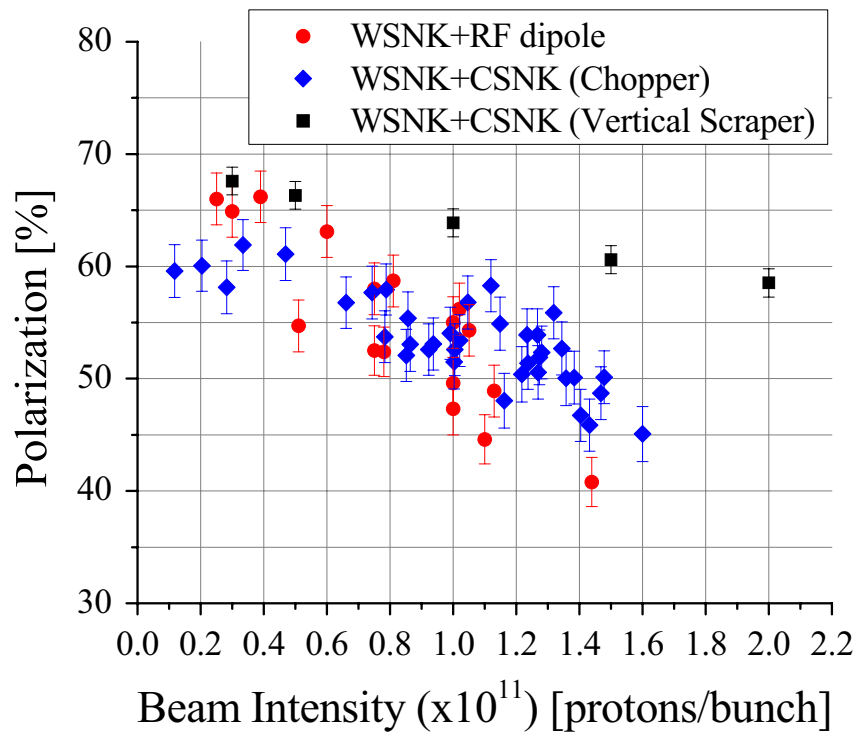


図 6-3-27 : Vertical Scraper を用いたときの偏極度のビーム強度依存性

このように、Vertical Scraper を用いた場合、偏極度のビーム強度に対する依存性は弱くなり、高いビーム強度においても高い偏極度を得ることができた。また全体的に偏極度が向上した。以上の結果より、エミッタンスをより小さくすることが偏極度の向上に重要であり、また偏極度のビーム強度に対する依存性を弱めることが可能であることがわかる。したがって当初の仮定どおり、エミッタンスの最適化がより高いビーム強度と高い偏極度を得るために重要であり、偏極陽子ビームの加速においては低エミッタンス・高強度のビームが理想的である。

### 6-3-5 ハーモニクスの補正

減偏極共鳴の強度を弱めるため、AGS 加速器内一周のビーム閉軌道をハーモニクス展開し、その補正を行った。ここで展開式を示す。

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (6-3-1)$$

AGS 加速器には垂直方向のビーム閉軌道の補正を行うため 95 個のハーモニクス補正用電磁石が設置されている。これらの電磁石を用いて cos と sin の振幅の調整を行い、ビーム閉軌道の補正を行うことでエミッタンス増大を抑え、減偏極の強さを弱めることができる。参考までに図 6-3-28 にビーム加速中の Sin7th～Sin10th および Cos7th～Cos10th の水平および垂直方向の振幅の測定結果を示す。

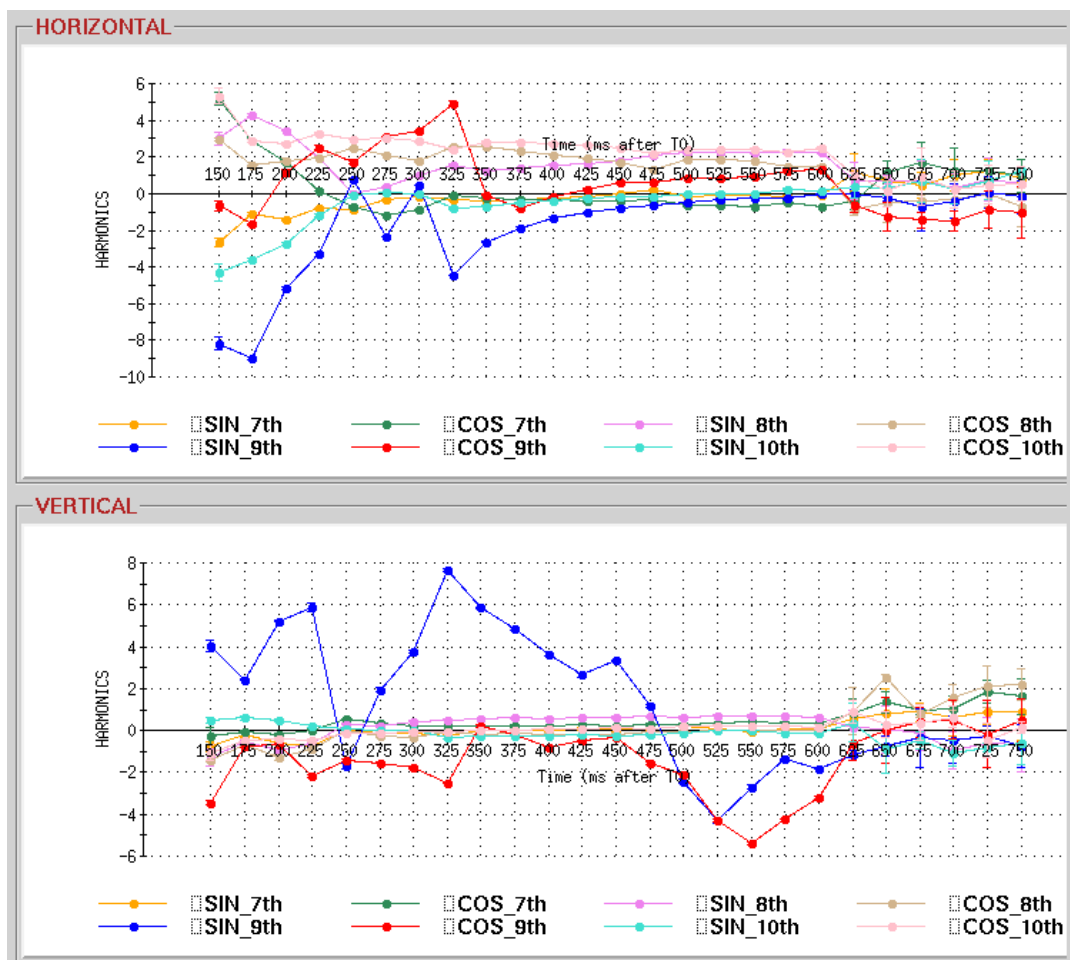


図 6-3-28 : AGS 加速器内のハーモニクス

図 6-3-28 の横軸はビームを AGS 加速器に入射した後の経過時間であり、経過時間が長いほどビームは加速されていることを示しており、縦軸は cos 波および sin 波の振幅を表す。AGS 加速器のベータトロンチューンは 9 に近いいため、9 倍波の補正が偏極度に対

し最も有効である。今回は Vertical intrinsic resonance のうち  $G\gamma = 0 + \nu_y$  および  $G\gamma = 36 + \nu_y$  における垂直方向の Sin9th および Cos9th の振幅を調整し、偏極度の測定を行った。図 6-3-29～図 6-3-32 にこれらの測定結果を示す。

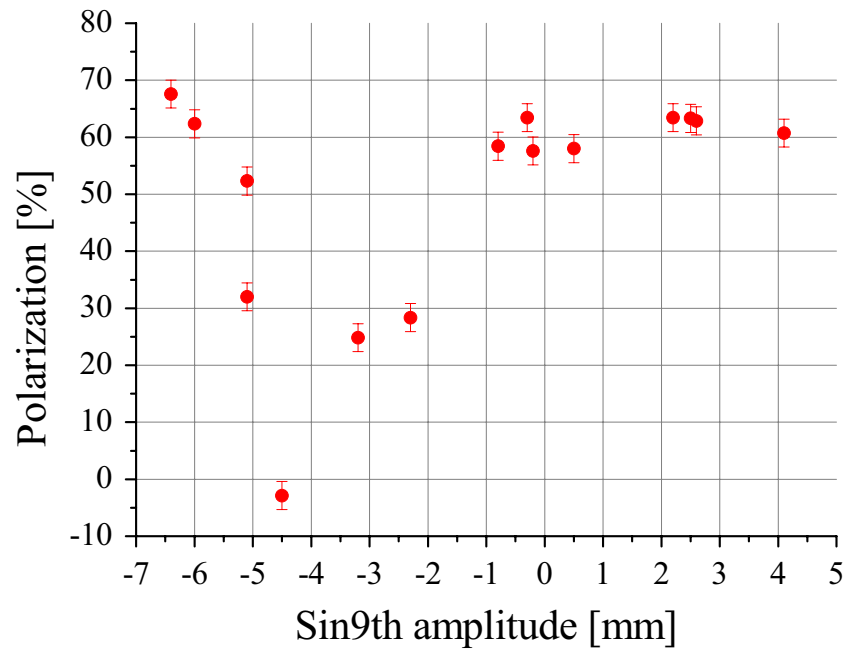


図 6-3-29 :  $G\gamma = 36 + \nu_y$  における偏極度の Sin9th ハーモニクス依存性

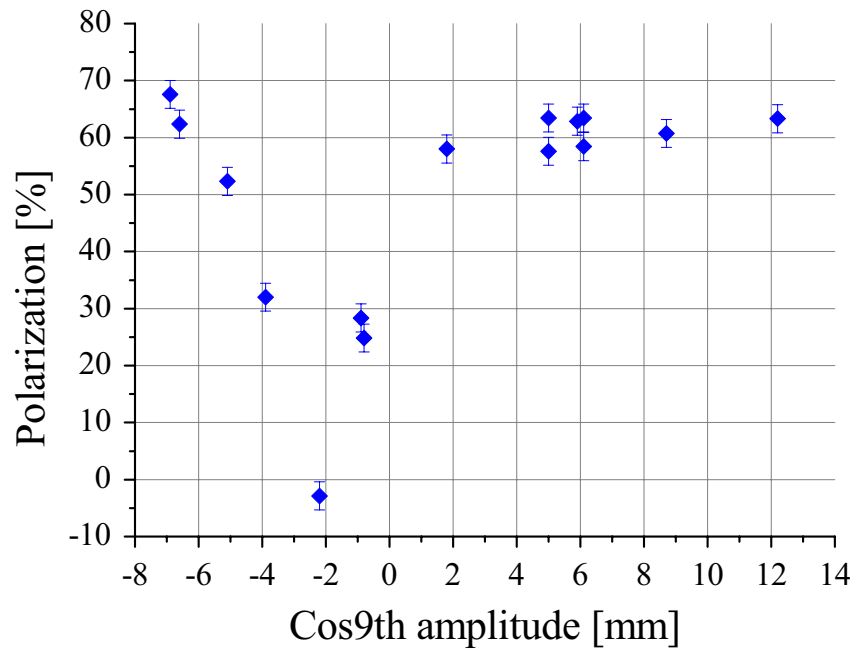


図 6-3-30 :  $G\gamma = 36 + \nu_y$  における偏極度の Cos9th ハーモニクス依存性

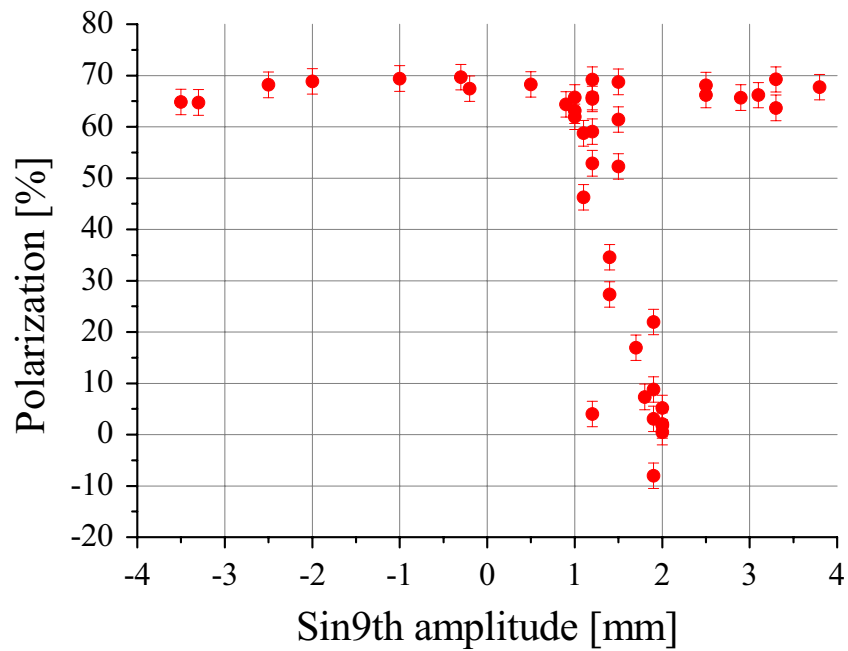


図 6-3-31 :  $G\gamma = 0 + \nu_y$  における偏極度の Sin9th ハーモニクス依存性

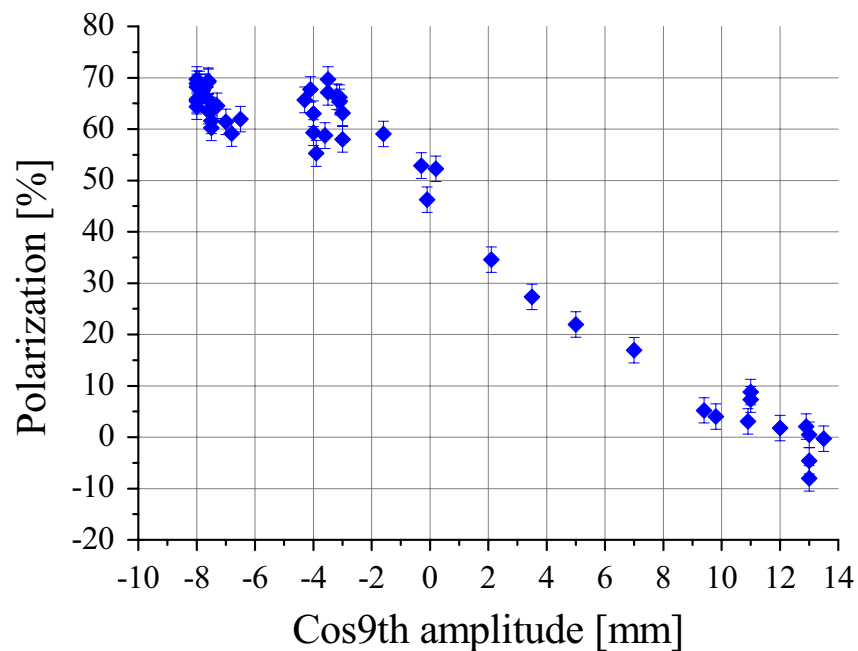


図 6-3-32 :  $G\gamma = 0 + \nu_y$  における偏極度の Cos9th ハーモニクス依存性

図 6-3-29 および図 6-3-30 に示されているように、 $G\gamma = 36 + \nu_y$  では Sin9th および Cos9th のハーモニクス振幅による偏極度の谷がある。ハーモニクスの振幅による影響は大きく、振幅によっては偏極度がほぼゼロになってしまう。逆にこの谷から離れたところでは偏極度が 60%以上であった。 $G\gamma = 0 + \nu_y$  における Sin9th についても同様に偏極度の谷がある。しかしながら、図 6-3-32 のように Cos9th では振幅をプラスのほうにするほど偏極度が下がっていく傾向であった。さらにプラスのほうへスキャンすることで偏極度は回復するものと思われるが、14mm 以上の振幅にすると AGS 加速器内のビームが消滅したため測定することはできなかった。このハーモニクススキャンを通して AGS 加速器の出射エネルギーにおける偏極度は 65%~70%にまで向上した。これまでの偏極度が 55%程度であった理由のひとつとして、Sin9th または Cos9th のハーモニクスが谷に近かったためと考えられる。このハーモニクスを補正した後、Chopper を用いた偏極度のビーム強度およびエミッタンスに対する依存性の測定を行った。

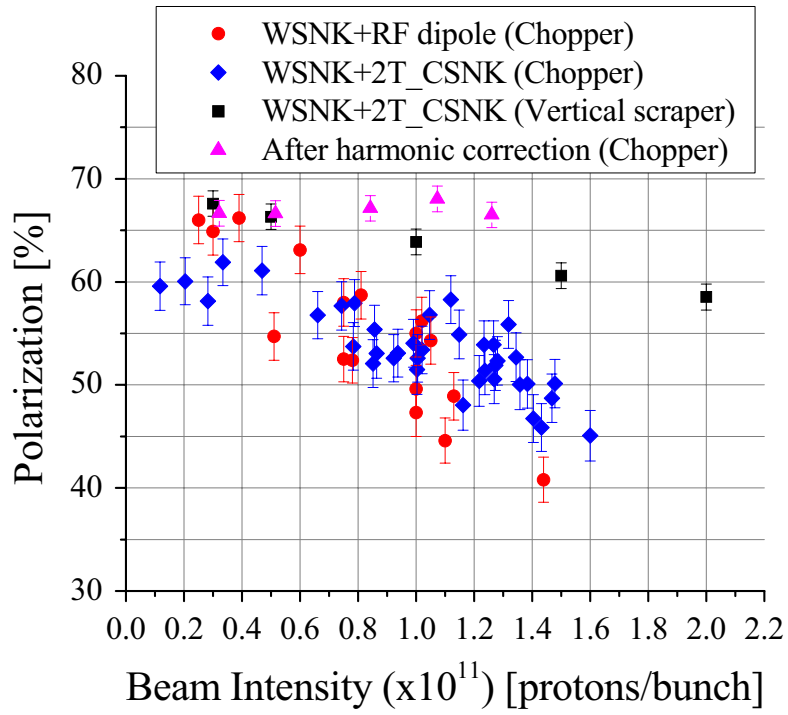


図 6-3-33 : ハーモニクス補正後の偏極度のビーム強度依存性

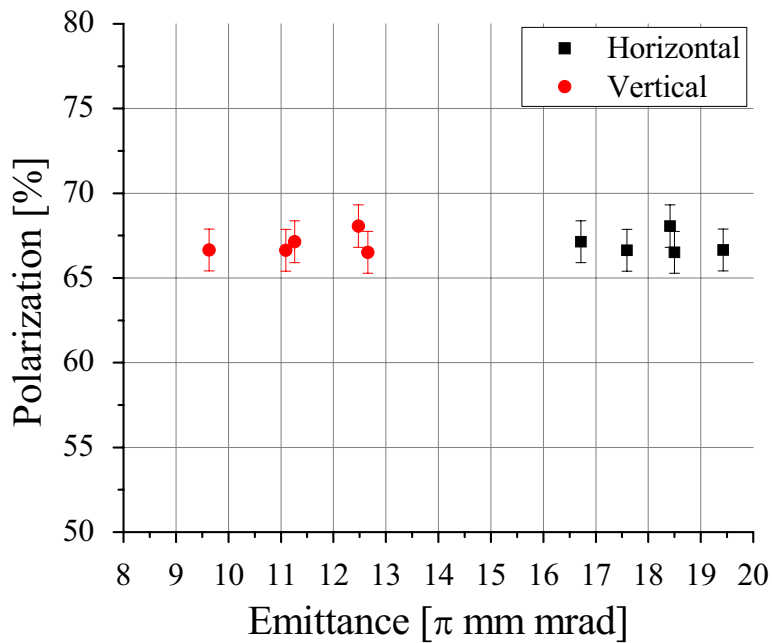


図 6-3-34 : ハーモニクス補正後の偏極度のエミッタンス依存性 (T=810ms)

図 6-3-33 および図 6-3-34 に示されているように、ハーモニクス補正後の偏極度はビーム強度およびエミッタンスに対する依存性が無くなった。したがって、偏極イオン源において Rb セルの温度を上げ、ビーム強度を強くしても高い偏極度を維持することが可能となった。

### 6-3-6 ハーモニクス補正後の Vertical tune scan

次に、ハーモニクス補正後の垂直方向のベータトロンチューンのスキャンを行った。図 6-3-35 に  $G\gamma = 0 + \nu_y$  における測定結果を、図 6-3-36 に  $G\gamma = 36 + \nu_y$  における測定結果を示す。

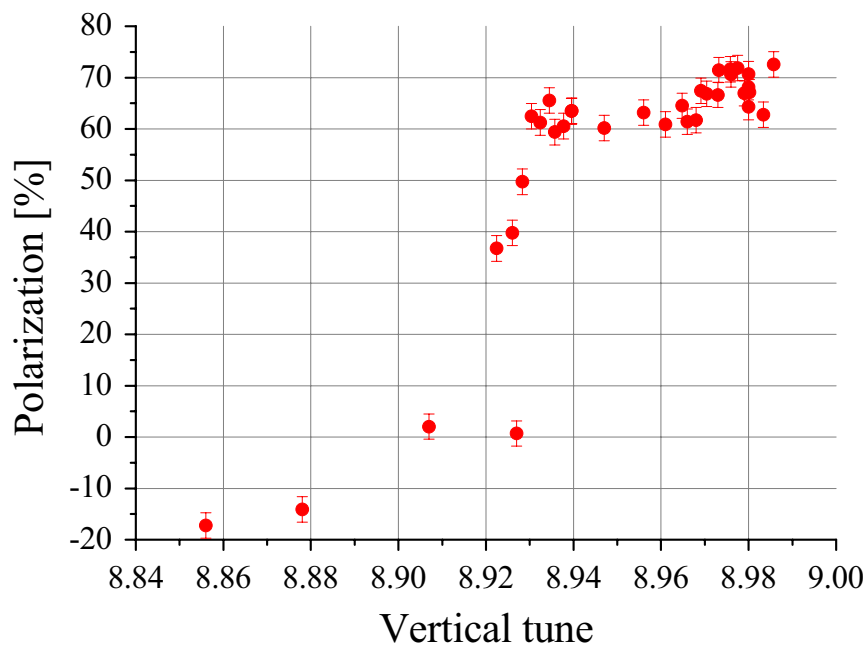


図 6-3-35 :  $G\gamma = 0 + \nu_y$  における垂直方向のベータトロンチューンスキャン

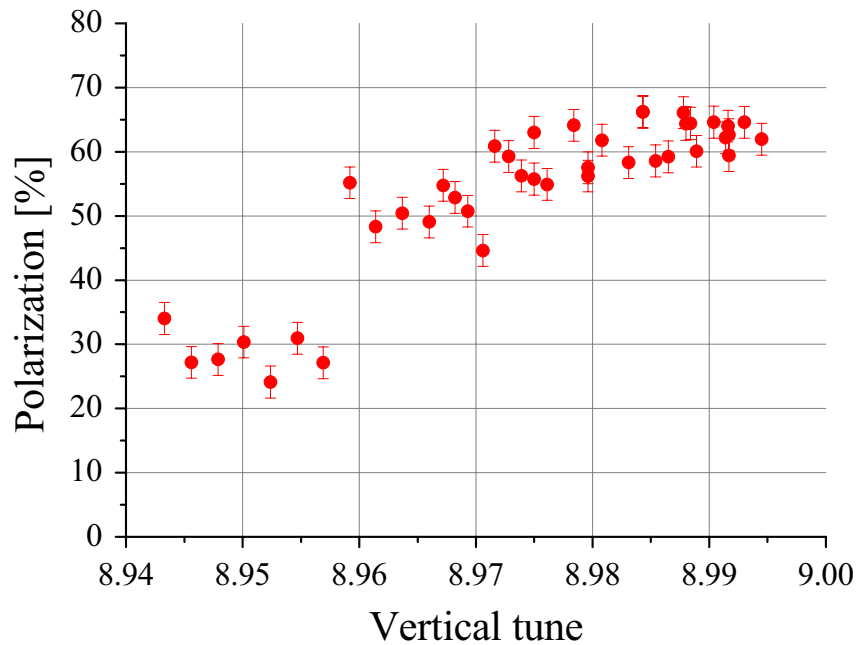


図 6-3-36 :  $G\gamma = 36 + \nu_y$  における垂直方向のベータトロンチューンスキャン

このように、 $G\gamma = 0 + \nu_y$  においては図 6-3-1 のベータトロンチューンスキャンの測定結果に比べより低いチューンでも高い偏極度を維持することが可能となった。偏極度は  $\nu_y = 8.92$  付近で落ちているが、この測定結果は Warm Snake と 2T の Cold Snake を組み合わせて運転した場合のスピントーンギャップの計算値である  $\nu_{sp} = 0.911$  に対し小数点以下の値に近い値となった。これは Cold Snake がほぼ予定通り稼動していることを示している。 $G\gamma = 36 + \nu_y$  ではチューンスキャンの結果から  $\nu_y = 8.96$  付近で偏極度が落ちてしまっているものの、図 6-3-4 に比べわずかに改善されている。しかしながら、このチューンスキャンを行ったときの  $G\gamma = 36 + \nu_y$  におけるハーモニック補正は不十分であったものと考えられる。最終的に 2006 年の加速器実験では AGS 加速器の出射エネルギーにおいて 65%の偏極度を達成し[6-13]、Figure of Merit は表 6-3-2 および表 6-3-3 に示されているように飛躍的に向上した。

表 6-3-2 : PHENIX 検出器における縦偏極衝突実験の Figure of Merit

Year	P [%]	L [ $\text{pb}^{-1}$ ]	$P^4L$ [ $\text{nb}^{-1}$ ]
2003	27	0.35	1.86
2004	40	0.12	3.07
2005	46	3.40	152.23
2006	62	7.50	1108.23

表 6-3-3 : PHENIX 検出器における横偏極衝突実験の Figure of Merit

Year	P [%]	L [ $\text{pb}^{-1}$ ]	$P^2L$ [ $\text{nb}^{-1}$ ]
2002	15	0.15	3.38
2005	47	0.16	35.34
2006	57	2.70	877.23

次に AGS 加速器のビームエネルギーをランプアップしたときの垂直方向のベータトロンチューンの測定を行った。

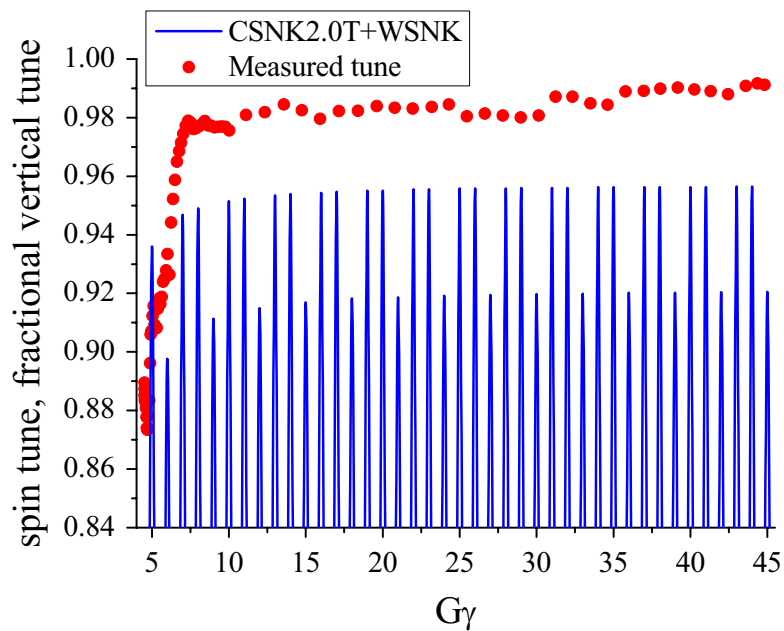


図 6-3-37 : ビームエネルギーランプアップ中の垂直方向のベータトロンチューンの測定結果と Spin tune の計算結果の比較

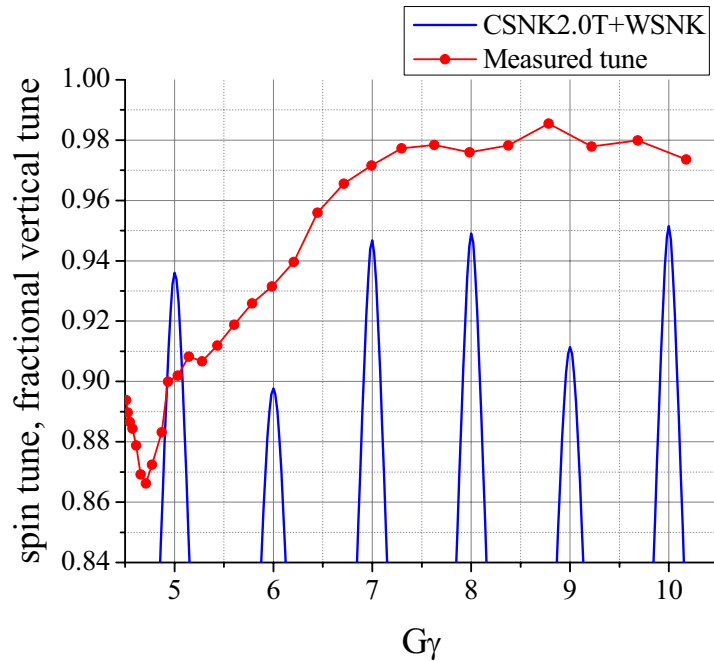


図 6-3-38 : 入射直後から最初の Vertical intrinsic resonance までの

垂直方向のベータatronチューンの測定結果とスピントチューンの計算結果の比較

このように、 $G\gamma = 5$ 以外の点においては垂直方向のベータatronチューンはすべてスピントチューンギャップ内に入っている。 $G\gamma = 5$ においてはベータatronチューンとスピントチューンが交差しているが、強い Vertical intrinsic resonance の条件には当てはまらないため著しい減偏極は生じない。しかしながら、理想的には $G\gamma = 5$ においてもベータatronチューンがスピントチューンギャップ内に収まることが望ましい。

### 6-3-7 1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転

スピンミスマッチの観点から、2台の同じ強さの Partial Siberian Snake を組み合わせて運転することが理想的である。2003年に $G\gamma = 0 + \nu_y$ の Vertical intrinsic resonance を Solenoidal snake を用いて乗り越える実験が行われた。[6-23] この実験の結果、Solenoidal Snake を 11.4%のスネーク強度で稼動したとき $G\gamma = 0 + \nu_y$ の Vertical intrinsic resonance を乗り越えることができた。この実験結果より、出射エネルギーにおけるスネーク強度が約 6%の Warm Snake と同じ強さで Cold Snake を稼動することでスネーク強度が 12%

となるため、すべての Vertical intrinsic resonance を乗り越えるためには十分であると考えた。Cold Snake を Warm Snake と同じスネーク強度にするため、Cold Snake の中心磁場を 1.5T に設定した。この 1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転は 2006 年の加速器運転期間の最後の 1 週間で行われた。まず、この運転パターンにおける AGS 加速器の入射点および出射点におけるスピンミスマッチの計算を行った。図 6-3-39 および図 6-3-40 に AGS 加速器入射エネルギーおよび出射エネルギーにおける Stable Spin Direction を示す。

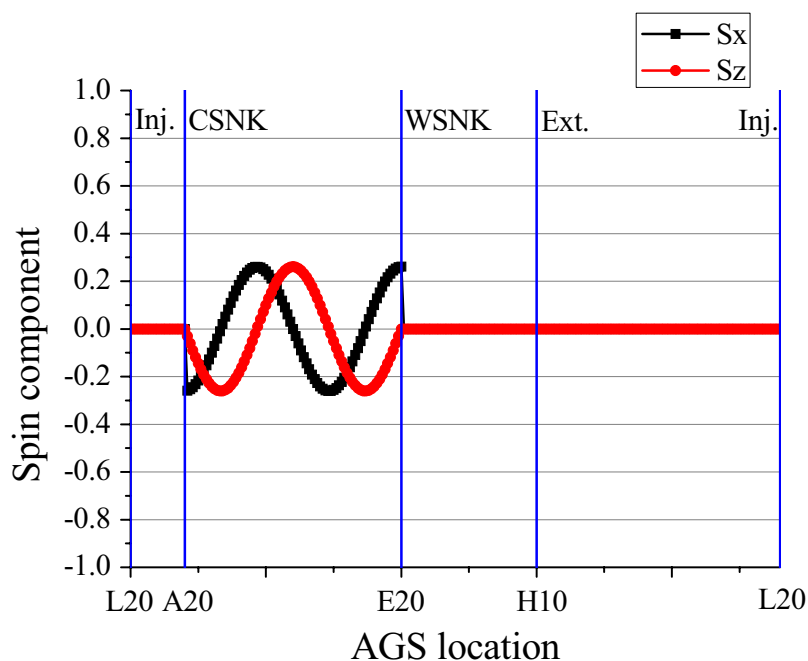


図 6-3-39 : 1.5T Cold Snake と Warm Snake を組み合わせたときの入射エネルギーにおける SSD

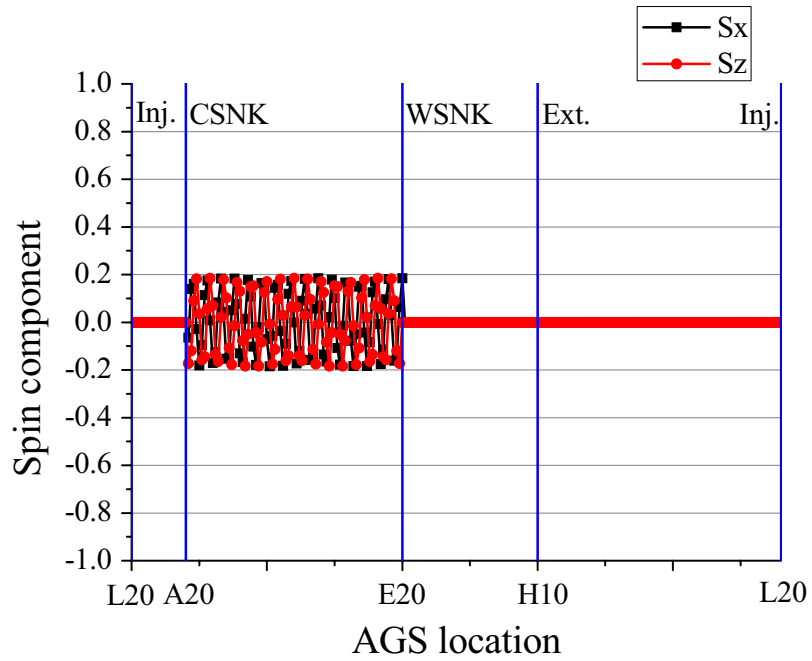


図 6-3-40 : 1.5T Cold Snake と Warm Snake を組み合わせたときの  
出射エネルギーにおける SSD

このように 2 台の同じ強さのスネーク電磁石を稼動することで、入射点および出射点におけるスピンミスマッチは完全にキャンセルされる。次に、出射エネルギーと最後の Vertical intrinsic resonance 付近におけるスピントーンの計算結果を図 6-3-41 に示す。

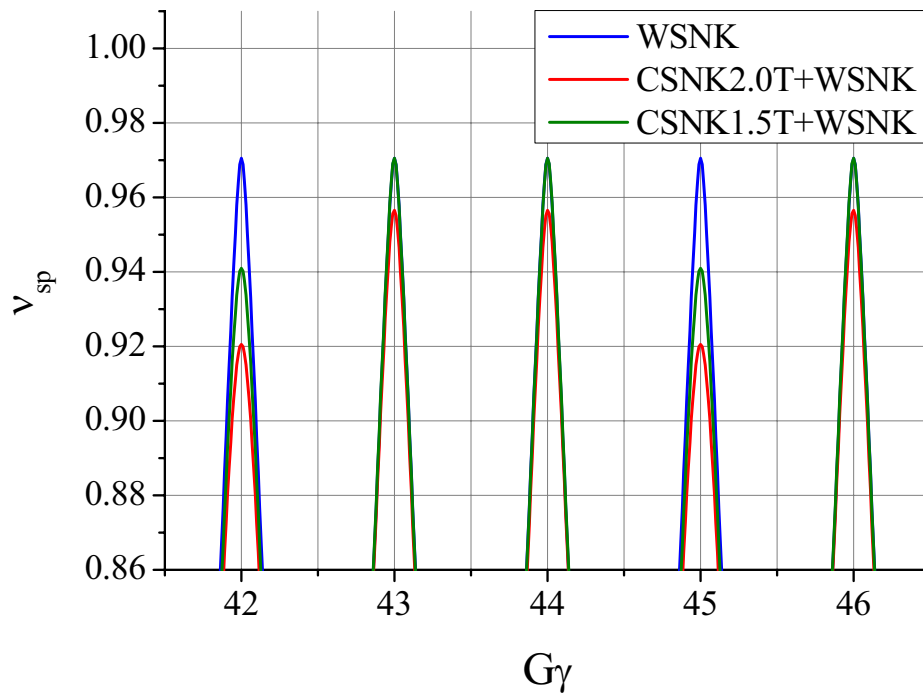


図 6-3-41 : 1.5T Cold Snake と Warm Snake を組み合わせたときの  
出射エネルギー付近のスピンチューンの計算結果

このように 1.5T の Cold Snake と Warm Snake を組み合わせて運転したときの  $G\gamma = 3n$  ( $n$ は整数)におけるスピンチューンギャップは Warm Snake だけを用いた場合より大きくなるが、2T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転よりは小さいギャップとなった。また、 $G\gamma = 3n$  ( $n$ は整数)以外のところでは Warm Snake のみを運転した場合と同じギャップの大きさとなった。

この運転パターンにおいてもハーモニクス補正を行った。その後、 $G\gamma = 0 + \nu_y$ ,  $12 + \nu_y$ ,  $36 + \nu_y$ におけるベータトロンチューンスキャンを行った。

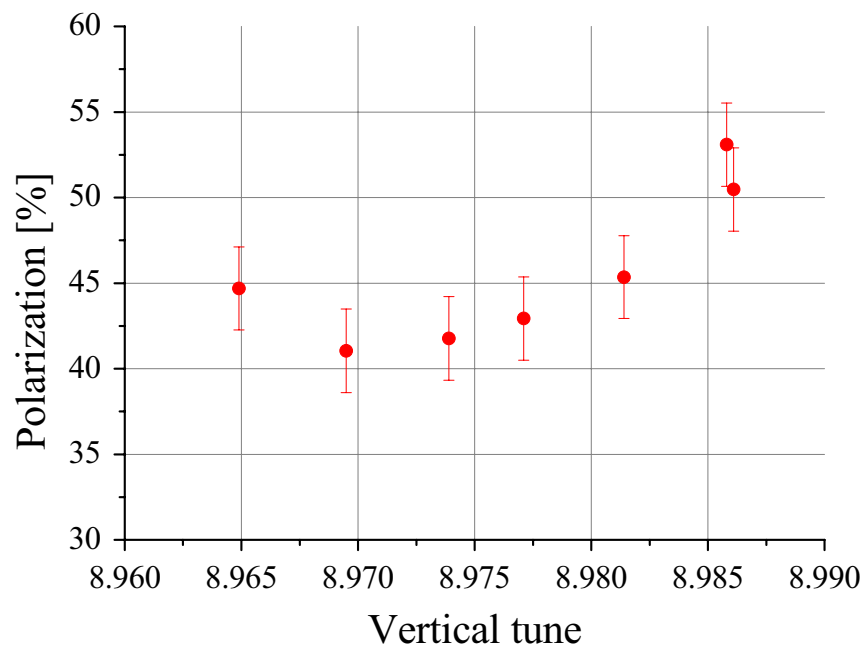


図 6-3-42 :  $G\gamma = 0 + \nu_y$  におけるベータトロンチューンスキャン

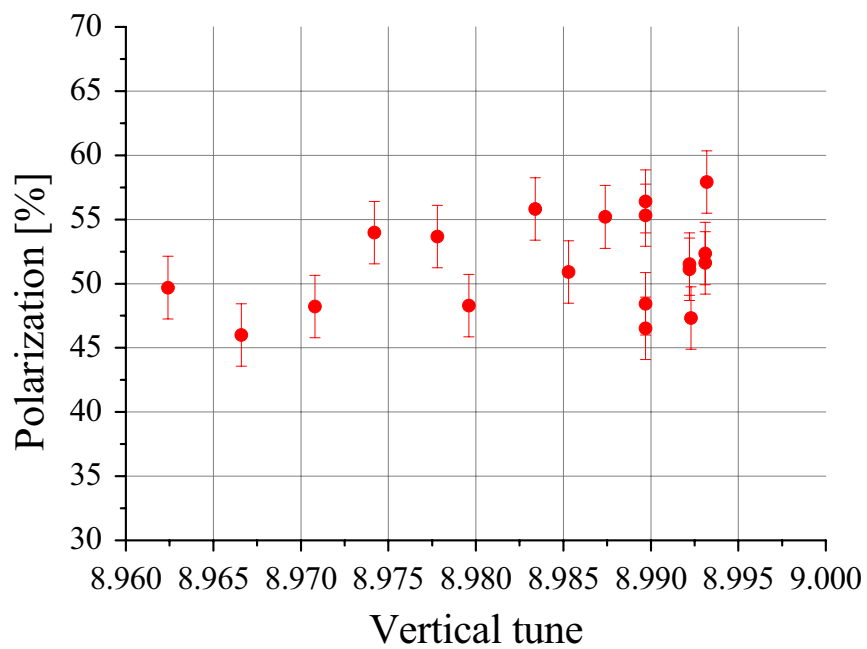


図 6-3-43 :  $G\gamma = 12 + \nu_y$  におけるベータトロンチューンスキャン

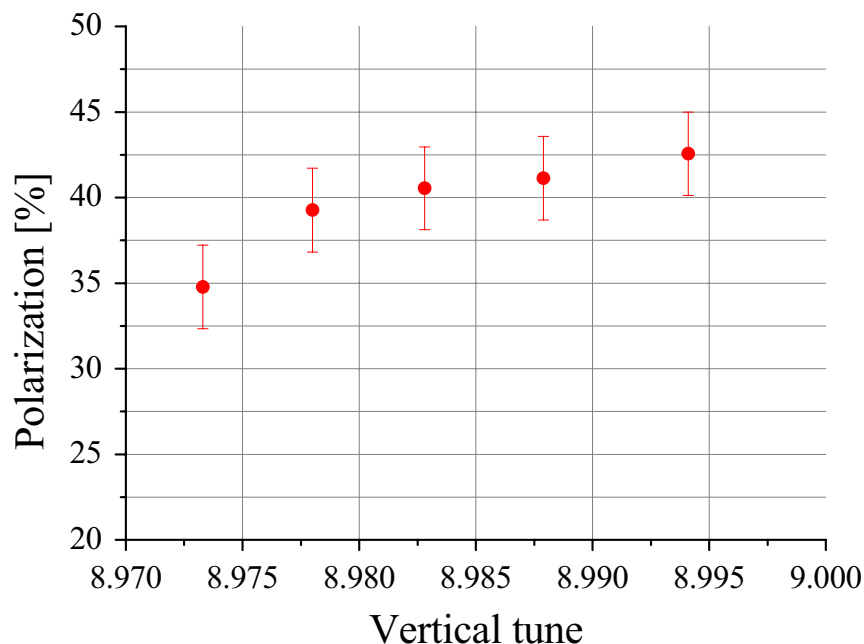


図 6-3-44 :  $G\gamma = 36 + \nu_y$  におけるベータトロンチューンスキャン

$G\gamma = 0 + \nu_y$  におけるベータトロンチューンスキャンの測定結果より、Vertical tune を 8.985 以上にしたとき、50%以上の偏極度を達成した。しかしながら、Vertical tune を 8.970 まで下げると偏極度も 40%強まで落ちてしまう。この原因として以下の 2 点が考えられる。

1. Warm Snake と 1.5T の Cold Snake の組み合わせ運転では  $G\gamma = 0 + \nu_y$  におけるスピントロンチューンギャップが不十分

2.  $G\gamma = 0 + \nu_y$  におけるハーモニクス補正の最適化が不完全

これに関しては次の  $G\gamma = 12 + \nu_y$  におけるチューンスキャンから判断することができる。 $G\gamma = 12 + \nu_y$  では Vertical tune を 8.96 付近まで下げても約 50%の偏極度を維持している。したがって、この共鳴点においてはハーモニクス補正もスピントロンチューンギャップも十分であることがわかる。ビームエネルギーが低いところでは偏極陽子ビームが受けるスネーク強度は強くなるため、 $G\gamma = 0 + \nu_y$  においてもスピントロンチューンギャップは十分なはずである。したがって、 $G\gamma = 0 + \nu_y$  でのチューンスキャンにおける偏極度減少の原因は 2 番のハーモニクス補正が不完全であったためと考えられる。 $G\gamma = 36 + \nu_y$  に

おけるチューンスキャンでは偏極度の極端な減少はないものの、Vertical tune を下げると緩やかに偏極度も下がる傾向にある。Vertical tune が高いところでは偏極度は40%以上を維持しているため、 $G\gamma = 36 + \nu_y$  においてもスピントーンは十分であると考えられる。しかしながら、ハーモニクス補正に関してはまだ改善の余地があると思われる。最後に2T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転および1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転における偏極度とビーム強度の測定結果と比較を図6-3-45を示す。

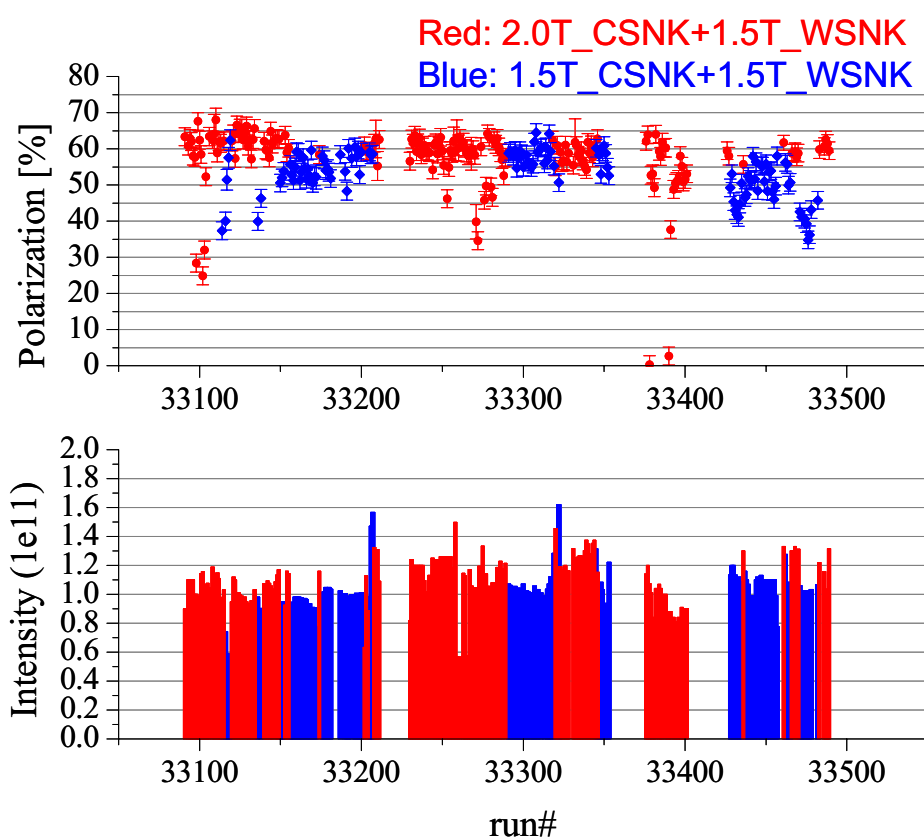


図 6-3-45 : Cold Snake を 2T と 1.5T にした場合の偏極度の比較

このように 1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転を行った場合でも 2T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転と同じレベルの偏極度とビーム強度を得ることができた。したがって、1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせによるスピントーンギャップは Vertical intrinsic resonance を乗り越えるために十分であることが実証さ

れた。これは 2003 年の 11.4% Solenoidal Snake の実験が正しいということを示す。ただし、1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転ではハーモニクス補正はまだ改善の余地がある。したがって、十分なハーモニクス補正を行うことで 1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転にてさらに偏極度が向上する可能性がある。

最後に 2T Cold Snake と Warm Snake の場合と 1.5T Cold Snake と Warm Snake の場合の Raw asymmetry の測定を行った。図 6-3-46 にビームエネルギーの前半部分を、図 6-3-47 に中盤部分、図 6-3-48 に後半部分の測定結果を示す。

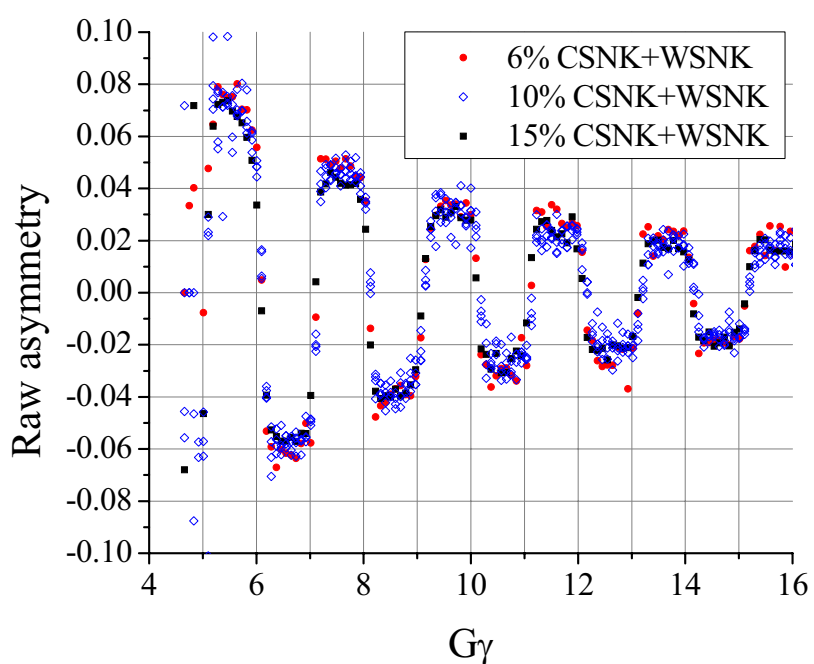


図 6-3-46 : ビームエネルギー前半部分の Raw asymmetry の測定結果

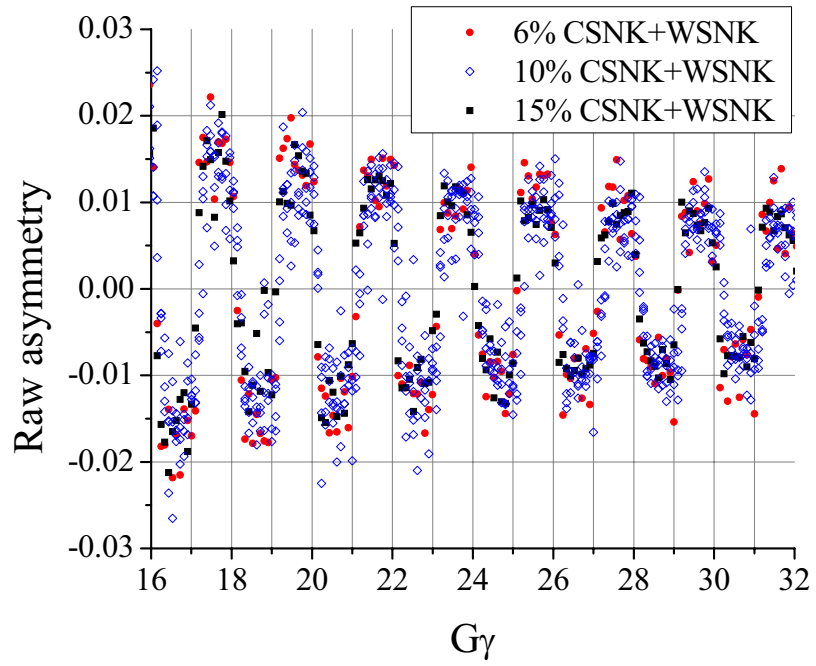


図 6-3-47 : ビームエネルギー中盤部分の Raw asymmetry の測定結果

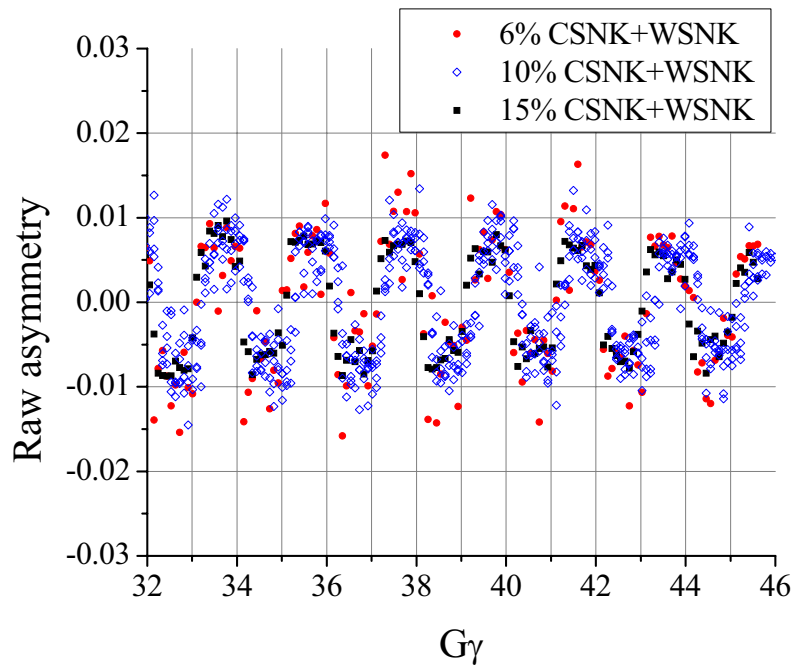


図 6-3-48 : ビームエネルギー後半部分の Raw asymmetry の測定結果

このように、Raw asymmetry の測定結果からも 1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転と 2T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転の場合と大きな違いを観測することはなかった。したがって、1.5T Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転で Vertical intrinsic resonance を十分乗り越えることができていることが実験的に示された。このことから 2 台の Warm Snake で十分であることが言えるが、今後も偏極陽子ビームの加速器実験を行う上では、スネーク強度というパラメータを用いてさらに詳細な減偏極効果の研究を行うことができるため、将来的には Warm Snake の代わりに新たに Cold Snake を導入し 2 台の Cold Snake の組み合わせ運転で実験を行うことが理想的である。この 2 台の Cold Snake を同時運転した場合のスピンミスマッチとスピントラップについては次章にて述べる。

#### 6-4 第 6 章のまとめ

日本で開発した Warm Snake は BNL にて磁場の測定を行い、その測定結果と三次元磁場計算の結果を比較し、磁場の補正を行った後、AGS 加速器に導入し、2004 年より本電磁石を用いた加速器実験を行った。2004 年の加速器実験では Warm Snake の運転電流と AGS 加速器内のビームカレントの関係を調べた。その結果、Warm Snake を 2700A で運転した場合、ビームカレントは Warm Snake を OFF にしたときよりも良くなった。これは Warm Snake を稼動したことによって AGS 加速器のベータトロンチューンがシフトし、ビーム閉軌道が改善されたためと考えられる。また、Warm Snake を 2600A で稼動した場合の AGS 加速器内のビームカレントの測定も行った。このとき、ビームカレントは途中で急激に減少してしまうという結果が得られた。これは第 5 章で行った積分磁場の測定より明らかで、Warm Snake の入口と出口でビーム位置のオフセットおよび Warm Snake 出口においてビームが出射角度を持つため、AGS 加速器のビーム閉軌道が乱されるため、ビームカレントが急激に減少してしまうと考えられる。Warm Snake を 2700A にしたときと 0A にしたときのベータトロンチューンのシフトについても測定を行った。この測定結果はビーム軌道計算プログラムである MAD を用いた計算結果と比較を行い、予定通りのチューンシフトであることを確認できた。以上のように Warm Snake が予定通り稼動し、AGS 加速器内でビームカレントを通常通り維持できているこ

とを確認した後、ビームエネルギーを上げながら Raw asymmetry の測定を行った。この測定結果と 2003 年の Solenoidal Snake を用いた測定結果の Transverse coupling resonance における Raw asymmetry の比較を行った。その結果、Warm Snake を用いた場合、Solenoidal Snake に比べ Transverse coupling resonance による減偏極効果が少なくなり、偏極度が向上していることを確認できた。2003 年の Solenoidal Snake を用いた場合の AGS 加速器の出射エネルギーにおける偏極度は 40%であったところ、2004 年の Warm Snake を用いた場合、偏極度は 50%を達成した。2005 年の加速器実験では Warm Snake の運転電流を詳細に最適化し、Warm Snake 入口におけるビーム位置の最適化も行った。その結果、AGS 出射エネルギーにおける偏極度は 55%を達成した。

2005 年にはさらにもう一台 BNL で開発した Cold Snake を AGS 加速器に導入した。Cold Snake は RF dipole を用いずに Vertical intrinsic resonance を乗り越えるために開発されたスネーク電磁石である。これは Cold Snake がその強い磁場をもってより大きなスピントリプティングギャップを作ることができるためである。しかしながら、この強い Cold Snake を単体で AGS 加速器を稼動した場合、AGS 加速器の入口および出口においてスピントリプティングギャップが大きくなってしまいう問題があった。この問題を解決する加速器の運転方法がダブルスネーク運転法である。この方法を用いることで Vertical intrinsic resonance では大きいスピントリプティングギャップを作り、なおかつスピントリプティングギャップを減らすことができる。本章ではこのダブルスネーク運転法のスピントリプティングギャップとスピントリプティングギャップの計算結果についても述べている。この Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転によってより高い偏極度を維持したままビームの加速が可能であると期待されていたが、2005 年の加速器実験では AGS 加速器の出射エネルギーにおける偏極度は Warm Snake のみを用いた場合と同じ 55%であった。この結果から、Vertical intrinsic resonance や Imperfection resonance 以外の減偏極効果があるものと考えられた。そこで、2006 年の加速器実験では、2004 年および 2005 年に観測されていた偏極度のビーム強度依存性に着目し、減偏極の原因を突き止める実験を行った。ビーム強度を上げるとビームエミッタンスが比例して増大するという測定結果を得られたため、減偏極の原因がビーム強度ではなくエミッタンスにある可能性があった。そこで、ビーム強度一定の条件下でビームキッカーを用いて意図的にエミッタンスを増大させ、偏極度の測定を行った。その

結果、偏極度はビーム強度ではなくビームエミッタンスに依存して減少してしまうということを実験的に示すことができた。この実験結果より、**Booster** 加速器でビームサイズを小さくし、**AGS** 加速器内に入射するビームサイズを小さくすることで、エミッタンスを小さくする方法で偏極陽子ビームの加速実験を行った。その結果、**AGS** 加速器の出射エネルギーにおける偏極度は約 65%にまで向上した。また、**AGS** 加速器のビーム閉軌道をハーモニクス展開した時の 9 倍波の振幅の大きさを変化させたとき、偏極度が強い相関を持っていることがわかった。この 9 倍波の振幅を最適化することで減偏極共鳴の強さを弱め、平均 65%超の偏極度を達成した。また、この補正の結果、偏極度のビーム強度依存性も無くなった。したがって、高偏極、高強度陽子ビームの実現が可能となった。

最後にスピンミスマッチの観点から、**Cold Snake** を **Warm Snake** と同じ磁場強度まで下げ、2 台の同じ強さのスネーク電磁石の組み合わせ運転を行った。これは **AGS** 加速器の入口および出口におけるスピンミスマッチを完全に消去するためである。しかしながら、この運転方法の場合、**Vertical intrinsic resonance** を乗り越えるために十分なスピントチューンギャップを得ることができない可能性があったが、短期間のビーム調整をもって約 60%の偏極度を達成した。今後さらに詳細にビーム調整を行うことによって、より高い偏極度を得ることが可能になるものと考えられる。

## 参考文献

- [6-1] J. Takano, *et al.*, “Design Study of a Normal Conducting Helical Snake for AGS”,  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. **14**, No.2, 457-460 (2004)
- [6-2] J. Takano, *et al.*, “Field Measurements in the AGS Warm Snake”,  
Proc. 2004 European Particle Accelerator Conference,  
Lucerne, Switzerland, 2113-2115 (2004)
- [6-3] J. Takano, *et al.*, “Optimization of AGS Polarized Proton Operation with the Warm Helical Snake”,  
Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, 1003-1005 (2005)
- [6-4] J. Takano, *et al.*, “Helical Dipole Partial Siberian Snake for the AGS”,  
Journal of Instrumentation, **1**, P11002 (2006)
- [6-5] W. W. MacKay, *et al.*, “Status of Proton Polarization in RHIC and AGS”, Proceedings of  
16<sup>th</sup> International Spin Physics Symposium, Trieste, Italy, (2004)
- [6-6] H. Huang, *et al.*, “Acceleration of Polarized Protons in the AGS with a Helical Partial Snake”, Proceedings of 16<sup>th</sup> International Spin Physics Symposium, Trieste, Italy, (2004)
- [6-7] A. U. Luccio, “Tracking through a Warm Helical Snake for the AGS”,  
BNL CAD/AP Note 136, January 30, 2004 (2004),
- [6-8] M. Bai, *et al.*, “Experimental test of coherent betatron resonance excitations”,  
Phys. Rev. **E56**, 5 (1997)
- [6-9] M. Bai, *et al.*, “Overcoming Intrinsic Spin Resonances with an rf Dipole”,  
Phys. Rev. Lett. **80**, 4673 (1998)
- [6-10] M. Bai, Ph. D. thesis, “Overcoming Intrinsic Spin Resonances by using an RF Dipole”,  
Univ. of Indiana (1999).
- [6-11] E. Willen, *et al.*, “Superconducting Helical Snake Magnet for the AGS”,  
Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, 2935-2937 (2005)
- [6-12] H. Huang, *et al.*, “Acceleration of Polarized Protons in the AGS with Two Helical Partial Snakes”, Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, 1404-1406 (2005)

- [6-13] H. Huang, *et al.*, “Acceleration of Polarized Protons in the AGS with Two Helical Partial Snakes”, Proc. 2006 European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, Scotland, 273-275 (2006)
- [6-14] MAD Home Page at CERN <http://mad.web.cern.ch/mad/>
- [6-15] J. Tojo, *et al.*, “Measurement of Analyzing Power for Proton-Carbon Elastic Scattering in the Coulomb-Nuclear Interference Region with a 22-GeV/c Polarized Proton Beam”, Phys. Rev. Lett. **89**, 052302 (2002)
- [6-16] J. Tojo, Ph. D. thesis, Kyoto University (2004)
- [6-17] J. Wood, Ph. D. thesis, “Polarimetry at the Brookhaven AGS Using Proton-Carbon Coulomb-Nuclear Interference”, Univ. of California Los Angeles (2005)
- [6-18] V. H. Ranjbar, *et al.*, “Spin coupling resonance and suppression in the AGS”, Phys. Rev. Special Topics – Accl. and Beams, **7**, 051001 (2004)
- [6-19] V. H. Ranjbar, Ph. D. thesis, “Increasing Proton Polarization in AGS and RHIC”, Univ. of Indiana (2002)
- [6-20] H. Huang, *et al.*, “Preservation of Proton Polarization by a Partial Siberian Snake”, Phys. Rev. Lett. **73**, 2982 (1994)
- [6-21] H. Huang, Ph. D. thesis, “Preservation of Polarization of Proton Beam in the AGS with a Partial Siberian Snake”, Indiana University (1995)
- [6-22] T. Roser, *et al.*, “Acceleration of Polarized Beams Using Multiple Strong Partial Siberian Snakes, Proc. of SPIN2004, Trieste, Oct. 10-16, 2004, F. Bradamante, *et al.*, eds. (World Scientific) p. 687
- [6-23] H. Huang, *et al.*, Phys. Rev. Special Topics – Accl. and Beams **7**, 071001 (2004)

## 第7章 今後の展望とまとめ

### 目次

7-1	3台の Partial Siberian Snake と偏極陽子の振る舞い	p.203
7-1-1	Triple snake のスピンミスマッチ	p.204
7-1-2	Triple snake のスピンチューン	p.209
7-2	2台の Cold Snake を用いた加速器運転	p.213
7-2-1	Double Cold Snake のスピンミスマッチ	p.213
7-2-2	Double Cold Snake のスピンチューン	p.214
7-3	日本における偏極陽子ビームの加速および原子核物理実験案	p.215
7-4	まとめ	p.217

## 第7章 今後の展望とまとめ

本章ではこれまでの加速器実験をふまえ、今後考え得る AGS 加速器における Siberian Snake 電磁石の運転パターンの計算結果について述べる。最後に本論文を総括しまとめとする。

### 7-1 3台の Partial Siberian Snake と偏極陽子の振る舞い

Warm Snake の導入以前、AGS 加速器では Imperfection resonance を乗り越えるために Solenoidal Snake が用いられていた。Solenoidal Snake は Warm Snake 導入の 2004 年以降は稼動されていなかった。これは Solenoidal Snake によって生じる Transverse coupling resonance を減らすためである。2006 年には Cold Snake が導入され、RF dipole を用いずるに全ての Vertical intrinsic resonance を乗り越えることが可能となった。前章で述べたように、Cold Snake 単体の稼動ではスピンミスマッチが大きくなってしまいう問題があったが、Warm Snake と中心磁場強度が 2T の Cold Snake を用いたダブルスネーク運転法によってスピンミスマッチによる減偏極を低く抑えることが可能である。しかしながら、この運転パターンの場合、2 台のスネーク強度が異なることからスピンミスマッチが残ってしまう問題があった。このスピンミスマッチを完全に消すため、前章において Cold Snake を Warm Snake と同じ 1.5T で運転し、Cold Snake を 2T にした場合とほぼ同じ偏極度を達成することができた。しかしながら、Cold Snake を 2T で運転したときに比べ、スピントラッキングギャップが小さいことから、高い偏極度を維持するために可能な限り垂直方向のベータトロンチューンを高くする必要があった。ただし、ベータトロンチューンを整数に近づけた場合、ビームそのものが消滅してしまうため、ビームと偏極度の両立が困難であった。この問題を解決するため、再度 Solenoidal Snake を活用し、AGS 加速器の入口および出口におけるスピンミスマッチを完全にキャンセルし、なおかつ Vertical intrinsic resonance におけるスピントラッキングをより大きくすることを考案した。7-1-1 ではこの 3 台の Siberian Snake を同時運転したときのスピンミスマッチについて、7-1-2 ではスピントラッキングについて述べる。

### 7-1-1 Triple snake のスピンミスマッチ

前節のダブルスネーク運転法と同様に3つ目のスネーク電磁石の配置も他の2台のスネーク電磁石から加速器リングの1/3対称の位置に設置すると最も効果的である。しかしながら、現在の Solenoidal Snake の位置は I10 であり、加速器リングの1/3対称である I20 の位置ではない。はじめに Solenoidal Snake を I10 に置いたまま稼動した場合、入射エネルギーおよび出射エネルギーにおける Stable Spin Direction の垂直方向のコンポーネントが Solenoidal Snake の強度を変化させることで、どのように振る舞うかについて計算を行った。

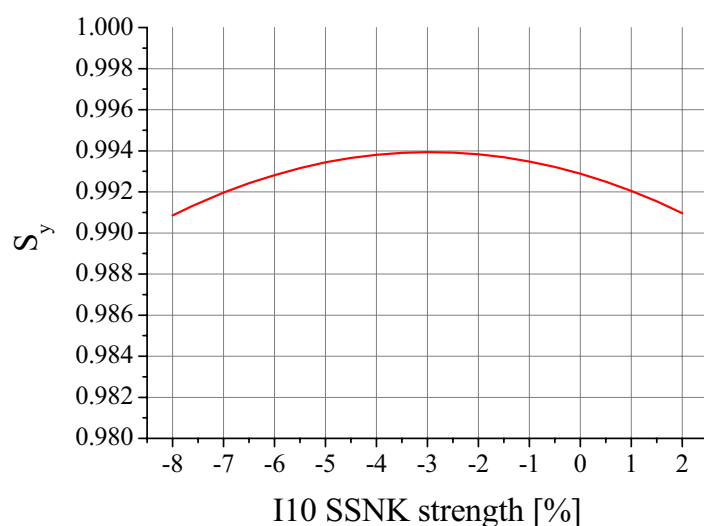


図 7-1-1 : 入射エネルギーにおける SSD の I10\_SSNK 依存性

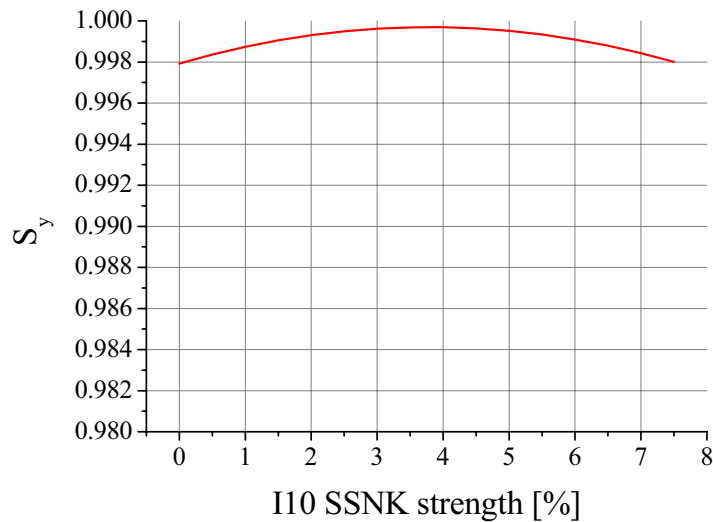


図 7-1-2 : 出射エネルギーにおける SSD の I10\_SSNK 依存性

この計算結果より、Solenoidal Snake が I10 に設置されている場合、AGS 加速器の入口および出口におけるスピンミスマッチを完全に消すことができないことがわかる。Solenoidal Snake を I10 に置いたままスピンミスマッチを最小化するためには Solenoidal Snake のスネーク強度は入射エネルギーでは-3%、出射エネルギーでは 3.8%となり、入射および出射におけるスネーク強度は正負反転させる必要がある。そのため、3 台のスネーク電磁石を用いる場合、3 つ目のスネーク電磁石はビーム加速中の短時間で電源の極性を反転させる必要があり、なおかつスネーク強度を変化させてもビームが消滅しないスネーク電磁石である必要がある。Cold Snake は短時間で電流を変化させるとクエンチを起こしてしまうため 3 つ目のスネーク電磁石として使用することができない。また、Warm Snake は電流を設計値から大幅に外れるとヘリカルダイポール内の螺旋ビーム軌道が大きく変化し、加速器内のビームが消滅してしまう。したがって、Cold Snake および Warm Snake は 3 つ目のスネーク電磁石としては不適格である。しかしながら、Solenoidal Snake は常電導であるためクエンチの心配はなく、電流値を変えても加速器内のビームが消滅することはないため、3 つ目のスネーク電磁石としては最適である。図 7-1-3 に入射エネルギーにおいて Warm Snake と 2T の Cold Snake および I10 の Solenoidal Snake を-3%のスネーク強度で稼動した場合の Stable Spin Direction を示す。ま

た、図 7-1-4 では出射エネルギーにおいて Warm Snake と 2T の Cold Snake および I10 の Solenoidal Snake を 3.8%のスネーク強度で稼動した場合の Stable Spin Direction を示す。

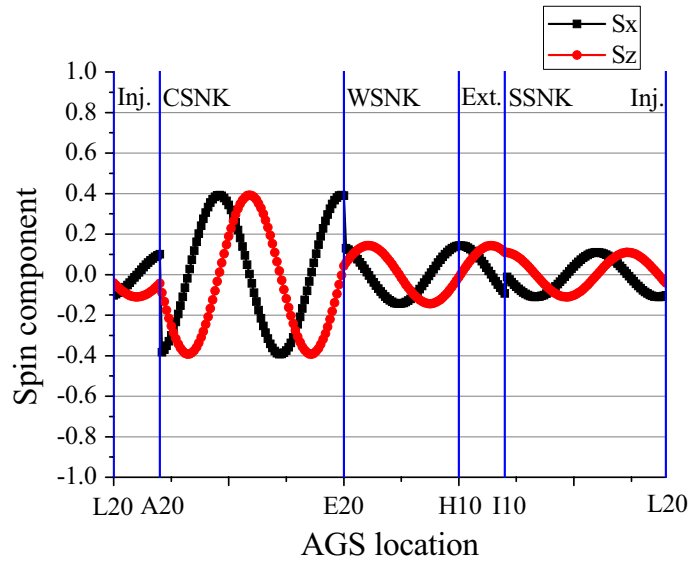


図 7-1-3 : WSNK と 2T\_CS NK および I10\_SS NK を-3%のスネーク強度で  
 運転した場合の入射エネルギーにおける AGS 加速器内の SSD

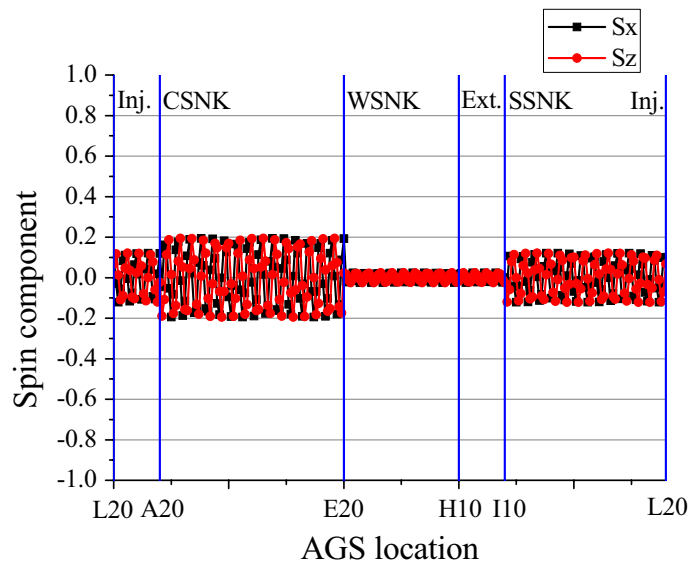


図 7-1-4 : WSNK と 2T\_CS NK および I10\_SS NK を 3.8%のスネーク強度で  
 運転した場合の出射エネルギーにおける AGS 加速器内の SSD

このときの AGS 加速器の入口における Spin Stable Direction の垂直方向のコンポーネントは  $S_y=0.9939$ 、出口では  $S_y=0.9997$  となった。この値は Warm Snake と 2T の Cold Snake の組み合わせ運転より改善されているものの、I10 の Solenoidal Snake では完全にスピンミスマッチを消すことはできない。

次に、Solenoidal Snake を I10 から I20 に移動した場合の Stable Spin Direction について計算を行った。

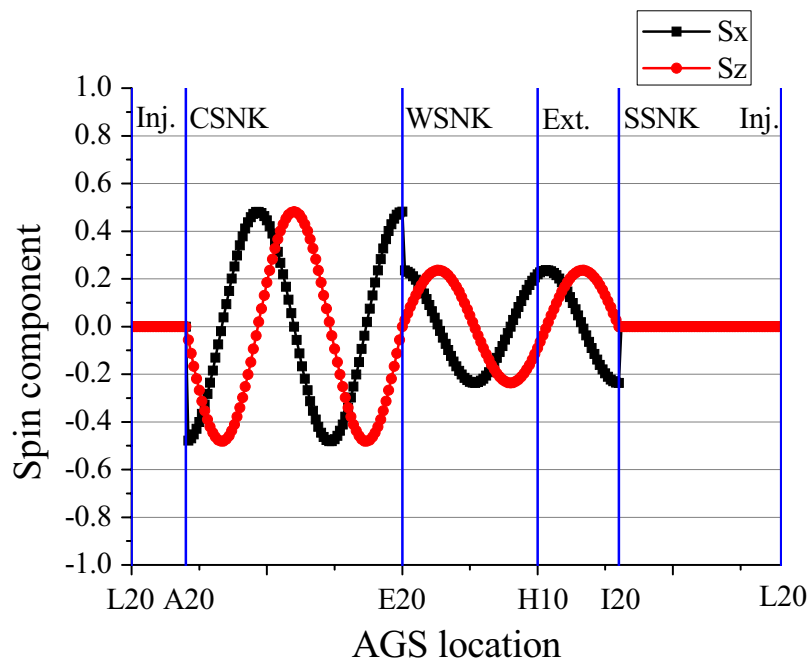


図 7-1-5 : WSNK と 2T\_CS NK および I20\_SSNK を-7.6%のスネーク強度で運転した場合の出射エネルギーにおける AGS 加速器内の SSD

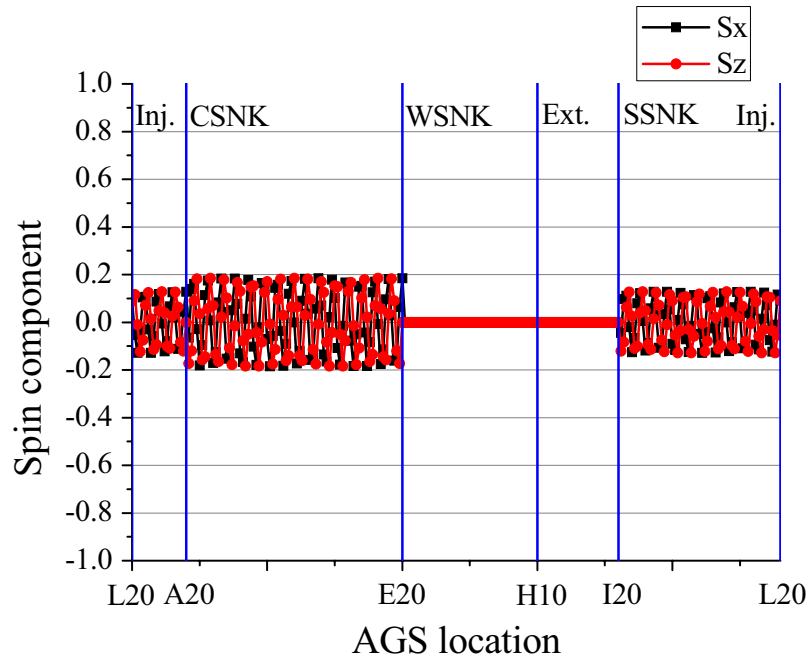


図 7-1-6 : WSNK と 2T\_CSNK および I20\_SSNK を 4.1%のスネーク強度で  
 運転した場合の出射エネルギーにおける AGS 加速器内の SSD

このように Solenoidal Snake を I10 から I20 に移動することで AGS 加速器の入口および  
 出口におけるスピンミスマッチを完全に消すことが可能となる。

表 7-1-1 にそれぞれのケースの AGS 加速器の入射点および出射点における Stable Spin  
 Direction の垂直方向のコンポーネントについてまとめたものを示す。

表 7-1-1 : Spin mismatch

	入射点	出射点
WSNK	0.9913	0.9957
2.5T_CSNK	0.9298	0.9511
WSNK+2T_CSNK	0.9929	0.9979
WSNK+2T_CSNK+I10SSNK	0.9939	0.9997
WSNK+2T_CSNK+I20SSNK	1.0000	1.0000

## 7-1-2 Triple snake のスピントラッキング

ここでは三台のスネーク電磁石を稼動した場合のスピントラッキングの計算とその考察を行う。まず Solenoidal Snake を I10 から I20 に移動した場合について計算を行う。このとき三台のスネーク電磁石の AGS 加速器内における位置は互いにリングの 1/3 対称になっている。したがってスピントラッキングの式は(7-1-1)のようになる。

$$v_{sp} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \cos\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_3}{2}\right) \cos(\pi G\gamma) - \sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{3} G\gamma\right) - \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_3}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{3} G\gamma\right) - \sin\left(\frac{\delta_3}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{3} G\gamma\right) \right\} \quad (7-1-1)$$

この式より得られた入射エネルギーから最初の Vertical intrinsic resonance までのスピントラッキングのグラフを図 7-1-7 に示す。

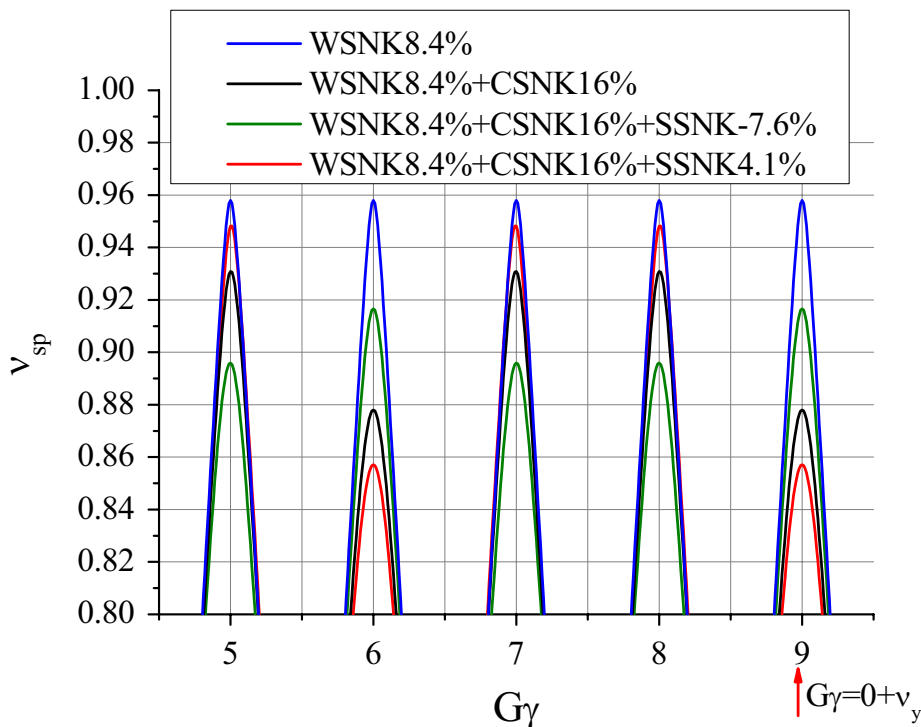


図 7-1-7 : 入射エネルギーから最初の Vertical intrinsic resonance までの範囲におけるトリプルスネークのスピントラッキング

このビームエネルギー領域においては Warm Snake および Cold Snake 内におけるビームエクスカージョンによって生じるスネーク強度の変化があるが、本計算では比較を簡単にするため入射エネルギーにおけるスネーク強度のまま一定として計算を行った。Warm Snake および 2T\_Cold Snake の入射エネルギーにおけるスネーク強度は 8.4% および 16% である。今回 Solenoidal Snake のスネーク強度については 2 種類の計算を行った。1 つ目は AGS 加速器の入射点におけるスピンミスマッチを完全にキャンセルすることができる -7.6% のスネーク強度。もう 1 つは AGS 加速器の出射点におけるスピンミスマッチを完全にキャンセルする 4.1% のスネーク強度である。-7.6% の Solenoidal Snake のまま最初の Vertical intrinsic resonance までビームを加速した場合、この共鳴点におけるスピントーンギャップが Warm Snake の単体運転に比べ大きいものの、ダブルスネークのスピントーンギャップより小さいことがわかる。したがって、この運転方法の場合、入射点におけるスピンミスマッチをキャンセルするためには有効であるが、Vertical intrinsic resonance に対してはダブルスネークより不利であると言える。次に、4.1% の Solenoidal Snake を用いた場合の運転法について考察を行う。このスネーク強度は AGS 加速器の出射点におけるスピンミスマッチをキャンセルするための Solenoidal Snake の強さである。まず、入射点においては Solenoidal Snake を -7.6% で稼動し、最初の Vertical intrinsic resonance に到達する前に Solenoidal Snake の強さを 4.1% に変化させたものと仮定する。この場合、Vertical intrinsic resonance におけるスピントーンギャップがダブルスネークの場合より大きくすることができる。Imperfection resonance におけるスピントーンギャップはダブルスネークの場合より小さくなってしまうものの Warm Snake 単体を稼動した場合よりも大きいため Imperfection resonance に対しても有効であると言える。

次に、Solenoidal Snake を I10 から移動せずに用いた場合について計算を行った。このときのスピントーンの式は(7-1-2)のようになる。

$$v_{sp} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \cos\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_3}{2}\right) \cos(\pi G\gamma) - \sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{3} G\gamma\right) \right. \\ \left. - \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_3}{2}\right) \cos\left(\frac{7\pi}{24} G\gamma\right) - \sin\left(\frac{\delta_3}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{9\pi}{24} G\gamma\right) \right\} \quad (7-1-2)$$

Solenoidal Snake を I10 に置いた場合と I20 に置いた場合のトリプルスネーク運転におけるスピントーンを図 7-1-8 に示す。

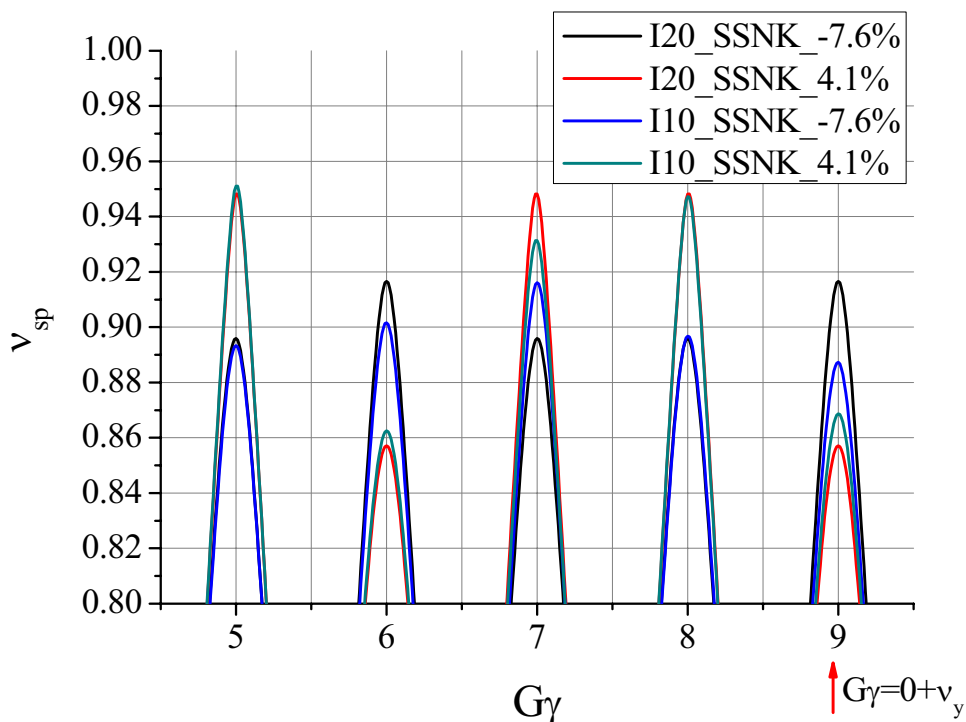


図 7-1-8 : Solenoidal Snake を I10 に置いた場合と I20 に置いた場合の比較

このグラフから分かるように、Solenoidal Snake を I10 で稼動した場合、Vertical intrinsic resonance におけるスネーク効果は I20 で稼動した場合に比べ弱くなっている。すなわち 4.1%のスネーク強度で稼動した場合、I20 のときほど大きなスピントーンギャップを作ることはできないが、-7.6%で稼動した場合では I10 の Solenoidal Snake は I20 ほどスピントーンギャップを小さくする効果が小さい。次に Solenoidal Snake を I10 で稼動したときのトリプルスネーク運転法と Warm Snake と Cold Snake のダブルスネーク運転法、および Warm Snake の単体運転の場合のスピントーンの比較を行う。

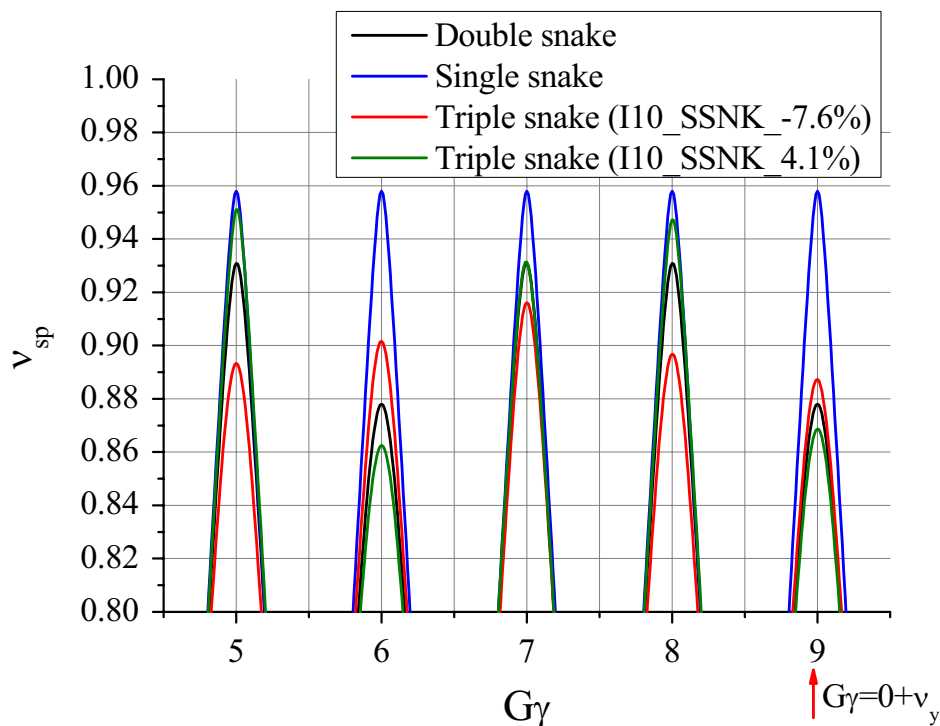


図 7-1-9 : Solenoidal Snake を I10 に置いた場合と I20 に置いた場合の比較

このように Solenoidal Snake を I10 でスネーク強度を 4.1%とした場合、I20 で稼動した場合に比べて効果は少ないものの、Vertical intrinsic resonance においてダブルスネークより大きいスピントーンギャップを作ることができる。また-7.6%のスネーク強度で稼動した場合も、Vertical intrinsic resonance における Solenoidal Snake によるスピントーンギャップの減少を抑えることができる。

以上のトリプルスネーク運転法におけるスピントーンとスピンミスマッチの計算より Solenoidal Snake を I20 に移動することで最も効果的にスピントーンギャップを大きくし、なおかつスピンミスマッチを完全にキャンセルすることができることがわかった。また、Solenoidal Snake を現状の I10 の位置のまま稼動した場合においても、効果は薄れるもののダブルスネーク運転法に比べスピントーンおよびスピンミスマッチにおいて有利であることがわかった。しかしながら、Solenoidal Snake は Transverse coupling resonance を引き起こしてしまう。この問題を解決するため、水平方向のベータ

トロンチューンもスピントチューンのギャップ内に入るように調整する必要がある。次回の加速器実験ではこのように水平方向のベータトロンチューンを調整し、Solenoidal Snake を I10 から移動せずに稼動する予定である。

## 7-2 2台の Cold Snake を用いた加速器運転

本節では将来的に Warm Snake の代わりに新たに Cold Snake をもう一台導入した場合についてスピンミスマッチおよびスピントチューンの計算を行い、2台の Cold Snake の同時運転を行った場合のメリットについて考察を行う。

### 7-2-1 Double Cold Snake のスピンミスマッチ

新たな Cold Snake を現在の Warm Snake の位置 E20 に設置した場合、前章で行った等強度ダブルスネークと同様に AGS 加速器の入口および出口におけるスピンミスマッチは完全にキャンセルすることが可能である。ただし、スネーク強度を強くした場合、A20 と E20 の間における Stable Spin Direction の歳差運動は増大する。図 7-2-1 および図 7-2-2 に入射および出射エネルギーにおける Stable Spin Direction の計算結果を示す。

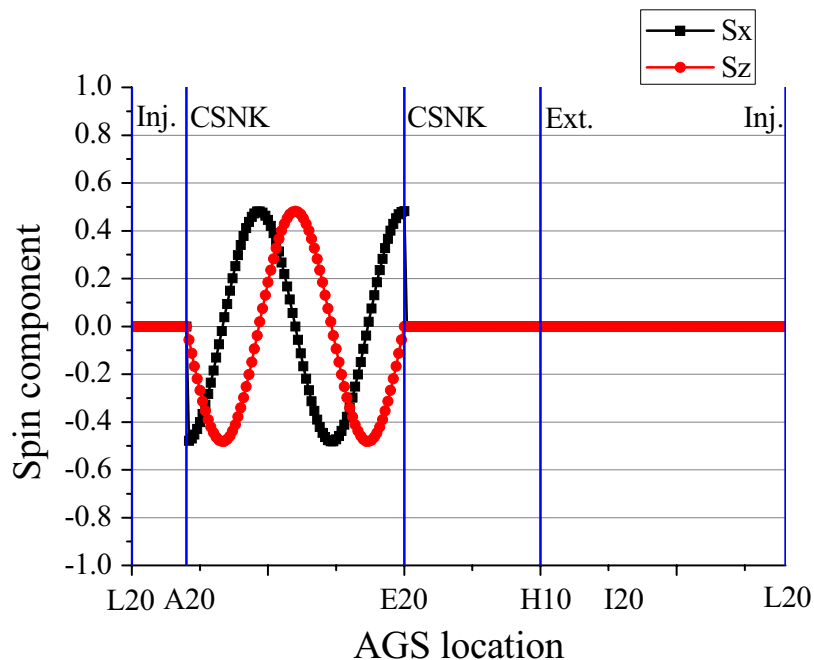


図 7-2-1 : 2台の CSNK を用いた場合の入射エネルギーにおける SSD

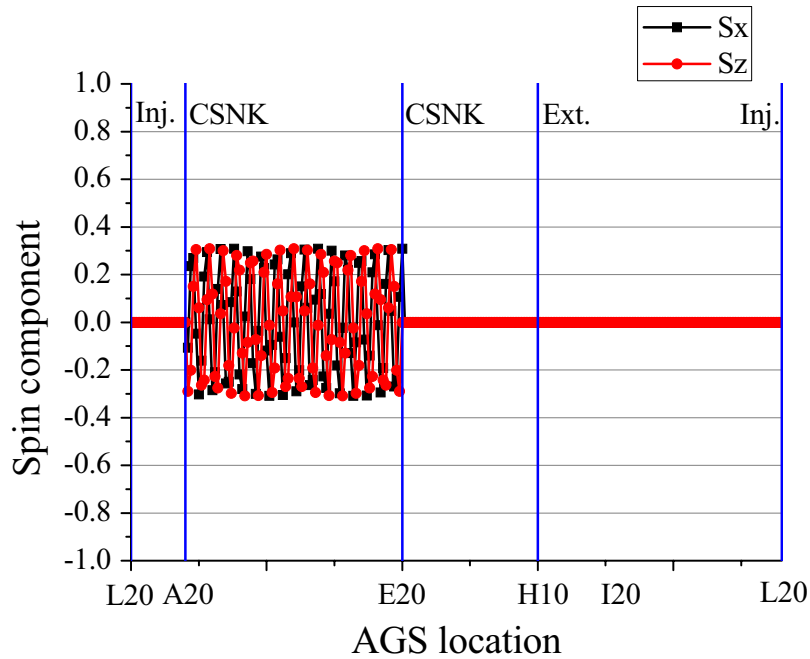


図 7-2-2 : 2 台の CSNK を用いた場合の出射エネルギーにおける SSD

この Stable Spin Direction の計算結果では 2 台の Cold Snake の中心磁場強度を 2T にした  
 場合のものである。このように 2 台の Cold Snake を同じ強さで運転した場合、スネー  
 ク強度によらずスピンミスマッチは生じないことがわかる。

### 7-2-2 Double Cold Snake のスピンチューン

2 台の Cold Snake を同じ強さで同時運転することでスピンミスマッチによる制限を受  
 けずにスピンチューンギャップを大きくすることが可能となる。図 7-2-3 に 2 台の Cold  
 Snake を 2T で運転した場合のスピンチューンの計算結果と Warm Snake を用いた場合の  
 スピンチューンの計算結果の比較を示す。

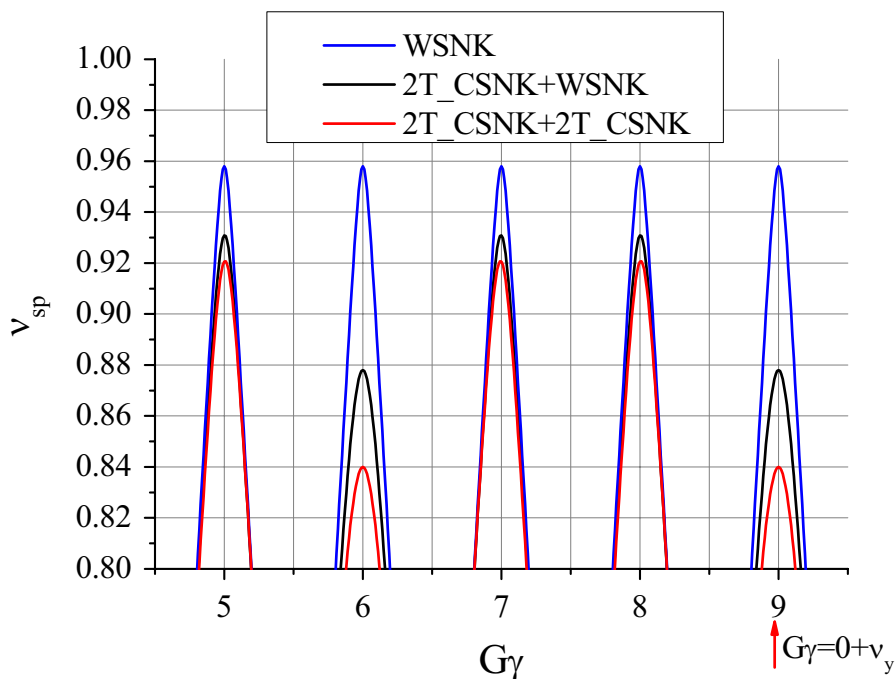


図 7-2-3 : 2 台の CSNK を用いた場合のスピントーン

このように、2 台の Cold Snake を A20 および E20 に導入することでスピントーンギャップを大きくすることができ、なおかつ AGS 加速器の入射点および出射点におけるスピンミスマッチも完全にキャンセルすることができる。したがって、2 台の Cold Snake を同じ強さで同時運転する加速器運転パターンが理想的であると言える。Cold Snake を設計最大磁場である 3T で稼動することでスピントーンギャップはより大きくなり、これまで見ていなかった新たな減偏極共鳴が見つかる可能性がある。

### 7-3 日本における偏極陽子ビームの加速および原子核物理実験案

現在、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が共同で東海村キャンパスにおいて大強度陽子加速器 J-PARC (Japan-Proton Accelerator Research Complex) を建設している。J-PARC においても将来的に偏極陽子ビームを加速する可能性がある。図 7-3-1 に J-PARC の全体図、図 7-3-2 に J-PARC における偏極陽子ビーム加速計画案を示す。

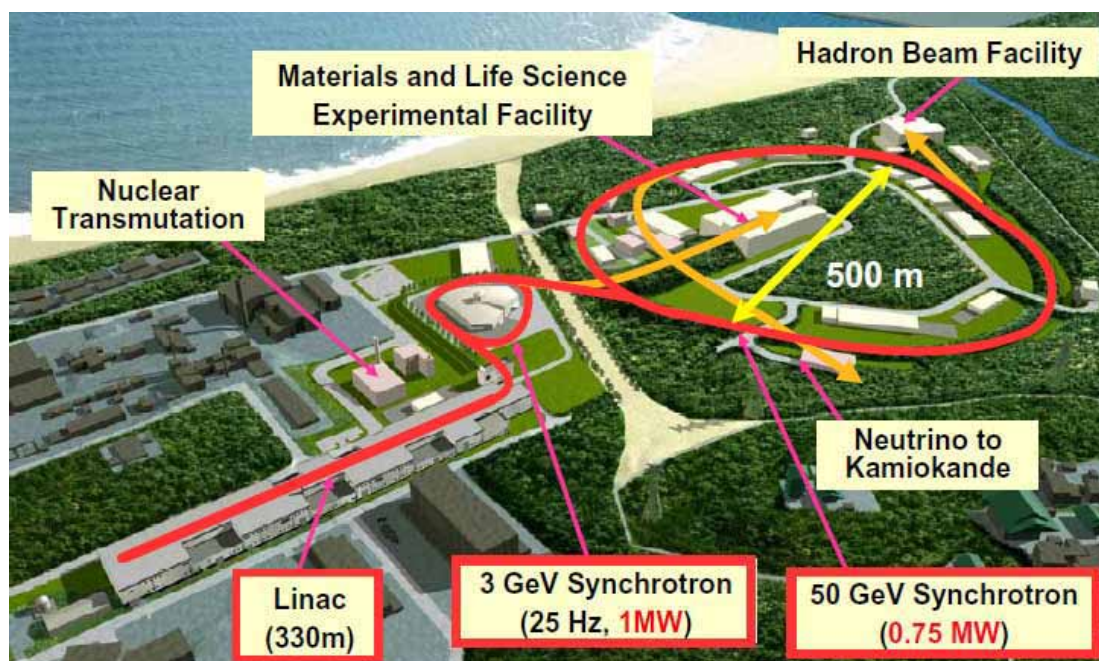


図 7-3-1 : J-PARC の加速器全体図

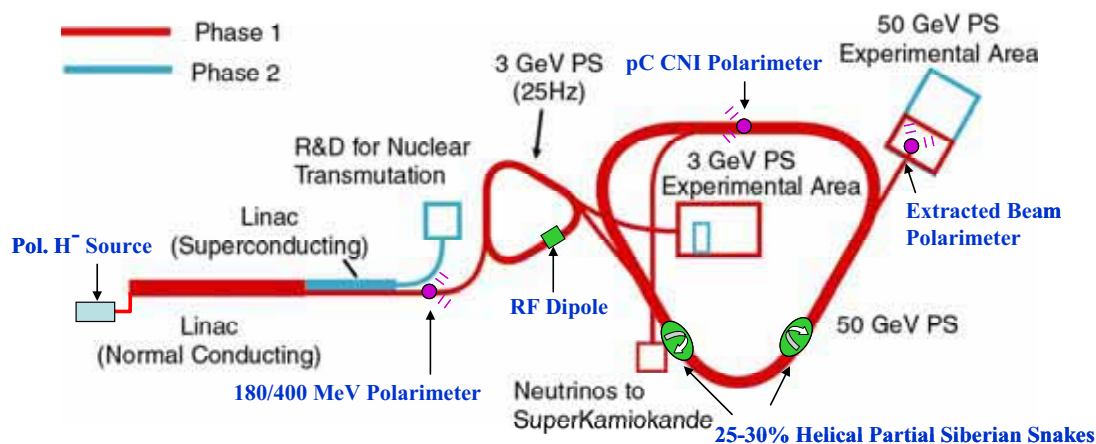


図 7-3-2 : J-PARC における偏極陽子の加速計画案

このように、J-PARCにおいても2台の Cold Snake を  $120^\circ$  対称の位置に導入し、高い偏極度を維持したまま 50GeV まで偏極陽子ビームを加速する計画案がある。これは AGS 加速器をベースに考えられた案であり、本論文の研究を通して AGS 加速器における偏極度が向上したことは J-PARC における計画においても重要な参考となる。特に偏極度のビーム強度依存性を無くし、高強度かつ高偏極の陽子ビームを加速するための実

験結果は非常に重要である。

## 7-4 まとめ

本研究では高い偏極度を維持したまま偏極陽子ビームを高エネルギーまで加速することを目的としている。2003年まで AGS 加速器においては Imperfection resonance を乗り越えるために Solenoidal Snake が用いられてきたが、この Solenoidal Snake は新たに Transverse coupling resonance を引き起こしてしまうことがわかっていた。これはビームの水平および垂直方向のベータatron振動が Solenoidal Snake によるビーム進行方向の磁場によってカップリングしてしまうためである。この問題を解決するためにビーム進行方向に対し垂直な方向の磁場でスピンの向きを変化させるヘリカルダイポール型の Siberian Snake 電磁石を開発する必要があった。今回常電導ヘリカルダイポール型 Partial Siberian Snake (Warm Snake) を日本で三次元磁場計算、設計および製作を行い BNL の AGS 加速器に導入した。このスネーク電磁石を用いて AGS 加速器でビーム実験を行い、偏極度を 55%まで向上させることに成功した。その後、BNL にて開発された超伝導ヘリカルダイポール型 Partial Siberian Snake (Cold Snake) も AGS に導入し、Warm Snake との組み合わせ運転も行った。その結果、平均偏極度 65%、最大偏極度は 73%を達成した。以下に各章における詳しいまとめを記す。

第1章「序論」では、スピン物理研究の概要と本研究の目的について述べた。当初陽子のスピンはその内部を構成しているクォークおよびグルーオンのうちアップクォークとダウンクォークのスピンの和で説明できると考えられていた。しかしながら、1980年代に行われた CERN における偏極ミュオンビームの実験よりクォークのスピンの寄与は 12%程度であることが実験的に示され、陽子スピンの起源が再び謎となった。これは「Proton Spin Crisis」と呼ばれている。このことから、陽子スピンの起源はグルーオンもしくは軌道角運動量と予想されている。この陽子スピンの起源の謎を解明するために BNL においてスピンの向きが揃った偏極陽子ビームを高エネルギーまで加速し、ビーム同士を衝突させることでグルーオンのスピンを調べる実験が行われている。より質

の高い実験を行うため、偏極陽子ビームの偏極度は  $P=70\%$  を目標としている。また衝突実験の **Figure of Merit** に対し偏極度は 4 乗で効果があるため偏極度の向上は非常に重要である。

第 2 章「シンクロトロン型加速器とスピ力学」では、弱収束および強収束シンクロトロン型加速器の構成とその電磁場内におけるスピンの振る舞いについて述べた。まず、常電導電磁石のいくつかのタイプについて特徴を示し、それぞれのメリット・デメリットをまとめた。弱収束シンクロトロンは BNL の加速器では用いていないが、強収束シンクロトロンとの比較のためまとめた。強収束シンクロトロンでは四重極電磁石を用いることでビームを水平および垂直方向に収束することが可能となった。このビームの収束効果によってシンクロトロン内においてビームはベータトロン振動が引き起こされる。次に、偏極陽子ビームの偏極度の定義を示し、円形加速器内で周回運動しているスピンをもつ粒子の振舞いに関する理論式である Thomas-BMT の公式を示した。荷電粒子の周回運動とスピンの歳差運動の数式の比較から、スピンの歳差運動が荷電粒子の周回運動の  $G\gamma$  倍であることがわかる。このことから、 $G\gamma$  をスピチューン  $\nu_{sp}$  と定義した。以上のスピチューンとベータトロン振動からシンクロトロン加速器内における減偏極共鳴の条件を簡単に述べた。この発生条件については第 3 章で詳しく述べる。一般的にシンクロトロン加速器における減偏極共鳴は **Imperfection resonance** と **Vertical intrinsic resonance** の 2 種類があり、それぞれの発生条件式を示した。

第 3 章「BNL の偏極陽子加速器」では、イオン源から線形加速器、Booster 加速器、AGS 加速器、RHIC 加速器および散乱粒子検出器まで説明し、これらに導入されている偏極を維持するための様々な装置について説明した。イオン源ではどのように偏極した陽子ビームが生成されるかについて詳しく述べた。線形加速器においては減偏極は生じない。この線形加速器の終端には偏極度計が設置されている。この測定結果より、線形加速器では減偏極は起きていないことがわかる。Booster 加速器はシンクロトロン加速器であるため減偏極共鳴が存在する。しかしながら、加速エネルギーのレンジが小さいため Booster 加速器では **Vertical intrinsic resonance** が生じないことを加速器のパラメータを

もとに示した。また、Imperfection resonance に関しても Booster 加速器内では 2 個だけであるため、容易に高い偏極度を維持することが可能である。AGS 加速器では 2003 年の時点で出射エネルギーにおける偏極度が 40%にまで減少していた。すなわち AGS 加速器は偏極度のボトルネックになっていると言える。まず AGS 加速器における Imperfection resonance と Vertical intrinsic resonance の発生条件式を示し、それぞれの減偏極共鳴を乗り越えるために導入された Solenoidal Snake と RF dipole について詳細に述べた。また、Solenoidal Snake によって生じる Transverse coupling resonance についても説明した。AGS 加速器には炭素リボンを用いた CNI 偏極度計が導入されている。この偏極度計の構成について詳しく述べた。RHIC 加速器では偏極陽子ビームは 100GeV まで加速される。RHIC 加速器においては偏極度を維持するために超伝導ヘリカルダイポール型の Siberian Snake が導入されている。また、RHIC 加速器には偏極水素ジェット偏極度計が導入されている。この偏極度計によって偏極度の絶対値を測定することができる。本章の最後には衝突実験の検出器について述べた。

第 4 章「常電導ヘリカルダイポール電磁石」では、Warm Snake の設計、冷却方式、三次元磁場計算、実機の製作、完成後の各種検査について述べた。磁場計算に関してはいくつかの計算コードの特徴を比較した。今回の三次元磁場計算では OPERA-3D/TOSCA を用いた。AGS 加速器の長さ方向に制限のあるストレートセクションにあわせて Warm Snake を設計する必要があった。Warm Snake の入口および出口におけるビーム位置のオフセットとビームの出射角度をゼロにするため、Warm Snake は 2 種類の螺旋ピッチを持つ構造になっている。このパラメータを三次元磁場計算で最適化した。電磁石の断面形状についても考察を行った。ヘリカルコイルはその螺旋ピッチに依存して断面形状の変形が大きくなることがわかった。このヘリカルコイルの断面形状の変形に合わせて鉄芯の断面形状もあわせて設計を行った。まず実機を製作する前に 1/5 スケールモデルを製作した。この段階で製作過程の問題点を確認し、その後実機の製作を行った。組立作業の際にはケイ素鋼板の螺旋ガイドを用いるなど様々な工夫を凝らすことで正確に三次元磁場計算と設計を実物化した。製作誤差についてはいくつか検

査を行い、その誤差を考慮し三次元磁場計算を再度行い、その補正方法についても検討を行った。コイルの温度上昇については抵抗電圧と流量の計算結果を元に求め、フルカレント試験を行った際の冷却水温度上昇を測定し、要求仕様内に収まっていることが確認された。

第5章「ヘリカルダイポール内の磁場測定」では、高精度の磁場測定を行い、前章の三次元磁場計算の結果との比較を行った。まず磁場測定の方法として、ホール素子法、核磁気共鳴法、ハーモニックコイル法について説明した。今回 Warm Snake の磁場測定にはハーモニックコイルを用いた。このハーモニックコイル法について数式を用いて説明した後、実測データの検討および三次元磁場測定との比較を行った。ここでは磁場分布、磁場の方向、積分磁場、多極磁場成分の測定を行った。計算結果と実測データに誤差はあるものの、第6章で述べたチューンシフトの測定結果からわかるように、この磁場の誤差は許容範囲であった。また、積分磁場に関しては磁極両端にシムを取り付けることで有効磁場長を伸ばし、磁場の誤差を修正した。

第6章「Siberian Snake を用いた偏極陽子の加速実験」では、新しく AGS 加速器に導入した Siberian Snake を用いた偏極陽子ビームの加速実験について述べた。2004年に日本で製作した Warm Snake を AGS 加速器に導入した。Warm Snake 稼動時の AGS 加速器内におけるビーム軌道の最適化を行った結果、AGS 加速器の出射エネルギーにおける偏極度は 55% を達成した。Transverse coupling resonance で Warm Snake を用いることでどの程度偏極度が向上したかについても比較を行った。また、ベータトロンチューンのシフトについても計算と測定結果の比較検討を行った。スネーク電磁石を用いることでスピントラッキングギャップやスピンミスマッチがどのようになるかについても数式およびグラフを用いて示した。2005年には Cold Snake が AGS 加速器に導入された。ここで、Cold Snake と Warm Snake を組み合わせて運転した際のスピントラッキングとスピンミスマッチの計算を行った。このとき Cold Snake のみを稼動した場合についても計算を行ったが、スピンミスマッチの観点から、2台のスネーク電磁石を組み合わせて運転したほうがより良い運転パターンであることがわかった。また、スピントラッキングの観点から Cold

Snake を設置する場所の検討も行った。その結果、Cold Snake を Warm Snake の位置から加速器リングの 1/3 対称の位置に導入することで Vertical intrinsic resonance におけるスピッチューンを大きくすることができることがわかった。しかしながら、2005 年の加速器実験では Cold Snake と Warm Snake の組み合わせ運転を行ったが、偏極度は 55% のままであった。そこで偏極度のビーム強度依存性を糸口に偏極度の向上を実験的に実現した。具体的にはエミッタンスとハーモニクス補正を行った。その結果、平均偏極度は 65% を達成し、最大偏極度は 73% を達成した。次回以降の加速器運転では定常的に 70% 超の偏極度を達成できるものと考えられる。また、Cold Snake を Warm Snake と同程度の磁場強度にまで磁場を弱めた場合についての加速器実験も行った。これは 2 台の Warm Snake を同時運転した場合を想定して行われた実験である。この運転方法のとき、スピンミスマッチの計算より、AGS 加速器の入口および出口におけるスピンミスマッチを完全にキャンセルすることが可能であることを示した。しかしながら、Vertical intrinsic resonance におけるスピッチューンギャップが十分でない可能性があった。しかしながら、この加速器実験で平均約 60% の偏極度を達成することができた。これはすべての Vertical intrinsic resonance を乗り越えていることを示す。ただし、今回はこの 2 台の同じ強さのスネーク電磁石を用いた加速器実験のためのビームタイムが短かったため、ビーム調整が不十分であった。次回の加速器実験の際に、この 2 台の同じ強さのスネーク電磁石を用いた加速器運転法のビーム調整を丁寧に行うことで、スピンミスマッチによる減偏極効果を受けず、より高い偏極度を達成できることを期待できる。

第 7 章「今後の展望とまとめ」では、3 台の Siberian Snake を用いた場合のスピンミスマッチおよびスピッチューンの計算を行い、そのメリットについて考察を行った。また将来的に Warm Snake の代わりに新たに Cold Snake をもう一台追加した場合のスピンミスマッチとスピッチューンの計算も行った。最後に、日本の新しい陽子加速器である J-PARC における偏極陽子ビームの加速案についても示した。

以上の研究結果により、AGS 加速器において如何に減偏極共鳴を避け、高い偏極度を維持したまま偏極陽子ビームを 24.3GeV まで加速することが可能かを計算および実

験の両方の視点から理解することができた。この研究結果をもって高い偏極度を維持したまま偏極陽子ビームを高エネルギーまで加速するための基本的な手法およびデータを  
得たことになる。今後、日本をはじめとする世界中の高エネルギー陽子加速器において  
偏極陽子ビームを加速する際に、本研究の成果は非常に重要なデータとなるであろう。

## 謝辞

本研究では多くの方々の御指導および御協力をいただき、多大な成果を挙げる事ができました。ここで皆様に感謝の意を表します。

東京工業大学・原子炉工学研究所の服部俊幸教授からは快く理化学研究所およびブルックヘブン国立研究所で研究活動を行うことを御承諾いただき、また親身な御指導をいただきました。時には Warm Snake の製作現場やブルックヘブン国立研究所までお越しいただき大変心強く思いました。

理化学研究所・延興放射線研究室の前前任研究員であり、現在ブルックヘブン国立研究所・Collider-Accelerator Department の研究員である岡村昌宏先生には修士課程より研修生として理化学研究所に受け入れていただきました。当初は本研究とは別件で三次元磁場計算ソフトウェアについて御指導いただいていたのですが、修士 1 年の冬に本研究を始めるとも貴重なきっかけをいただきました。また、研究活動全般において様々な御指導をいただきました。色々とお心労をおかけしましたが、ここまでたどり着けたのは岡村先生のおかげです。

理化学研究所・延興放射線研究室・主任研究員の延興秀人先生には本研究遂行にあたり非常に重大な御決断をいただきました。おかげさまで私の予想をはるかに超えた成果を挙げる事ができました。また、延興放射線研究室に Junior Research Associate として受け入れていただいたおかげで、アメリカでの生活面で苦勞せずに研究活動に没頭する事ができました。

ブルックヘブン国立研究所・Collider-Accelerator Department では多くの研究者や技術者、秘書の方々にお世話になりました。特に加速器に関する議論および実験は非常に貴重な経験でした。また加速器の運転について私の意見を受け入れていただいたおかげでとても良いデータを取得する事ができました。

RIKEN Brookhaven Research Center (RBRC) のスピン物理研究に携わる日本人研究者、ポスドク、大学院生、事務官、秘書の方々とは日頃加速器グループでは使えない日本語で話すことができ精神的に安心できました。また、パーティー、ソフトボール、テニス、バーベキュー、マンハッタンツアー、ワイナリーツアーなど、共に過ごさせていただいた時間はとても楽しい思い出ばかりです。もちろん、物理に関する議論も非常に有意義でした。この偏極度が向上した陽子ビームを用いた実験結果でノーベル物理学賞が出ることを心より期待しております。

東京工業大学・原子炉工学研究所・服部研究室助手の林崎規託先生にはアメリカ滞在中

に様々な事務的な手続きをしていただきました。今回無事卒業することができるのは林崎先生の御協力をいただけた結果だと思っています。また、服部研究室の学生および卒業生の皆様とはゼミを通して加速器に関する議論することができ大変有益でした。特に理化学研究所で岡村組として共に研究生活を送った柏木氏(現・日本原子力研究機構・研究員)、山本氏(現・放射線医学総合研究所・博士研究員)、田村氏(服部研・修士および BNL 岡村組)とはとても充実した研究活動を行うことができました。

最後に、これまで育ててくれた両親に感謝します。また本研究に有限会社タカノ技研としても Warm Snake の製作に協力してくれました。心より御礼申し上げます。

これからも以上の方々のうち多くの方にお世話になると思います。まだまだ未熟者ですが今後とも皆様どうぞよろしくお願ひ申し上げます。

## 高野 淳平

2006 年 クリスマスイブの夜



Warm Snake の鉄芯完成時の記念写真



BNL Accelerator Physicists



Main Control Room staff

# 付録

## 目次

付録 1	BNL の加速器全体図とアップグレード	p.226
付録 2	初期のヘリカルダイポールの模型	p.228
付録 3	Warm Snake の設計図	p.229
付録 4	Warm Snake の製作過程	p.231
付録 5	Warm Snake の評価	p.234

# 付録 1

ここでは BNL 加速器の全体図を用いて各年のアップグレードを示す。図 AP1-1 は BNL 加速器の航空写真である。

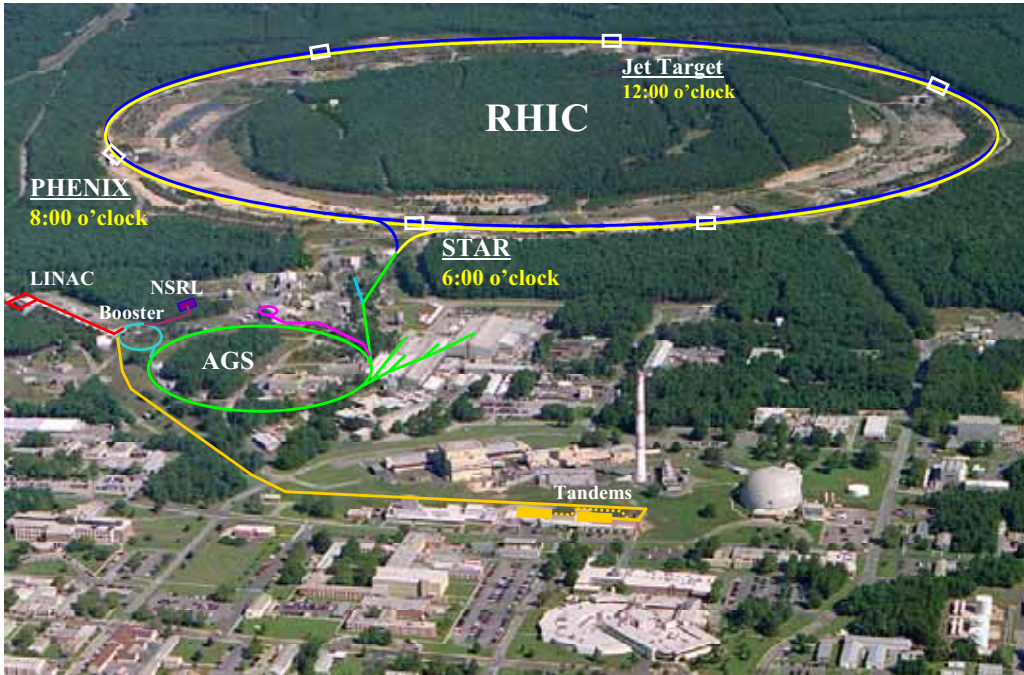


図 AP1-1: BNL 加速器の航空写真

2003 年まで AGS 加速器は Solenoidal Snake と RF dipole の組み合わせ運転で偏極度を維持していた。

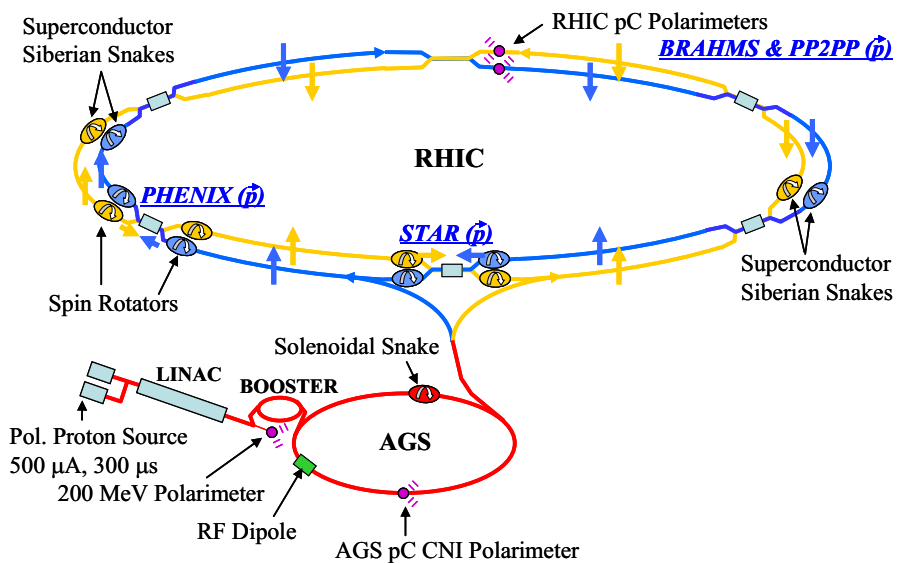


図 AP1-2: 2003 年の BNL 加速器

2004年には新たに Warm Snake が AGS 加速器に導入され、RF dipole との組み合わせ運転を行った。2005 年も同様の運転パターンで RHIC 加速器に偏極陽子ビームを供給した。また RHIC 加速器では水素ジェット偏極度計が導入された。

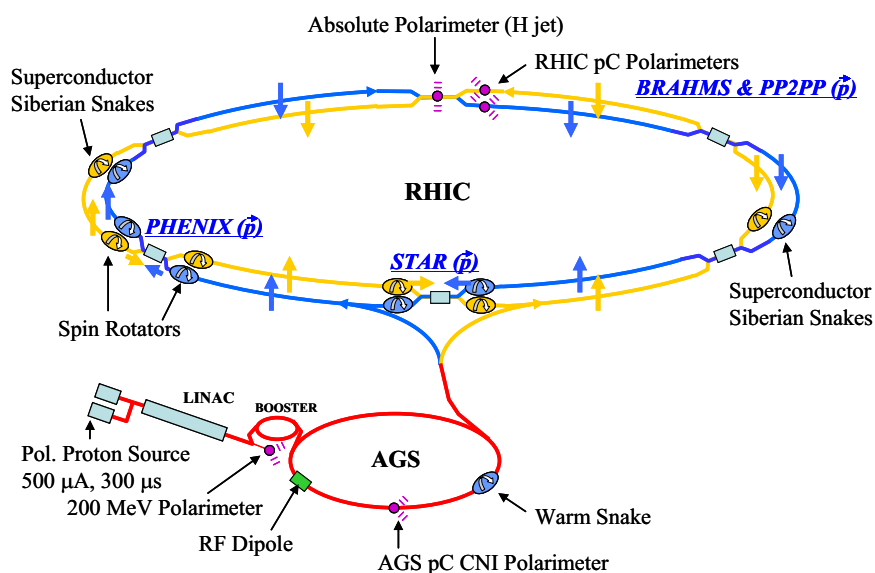


図 AP1-3:2004 年および 2005 年の BNL 加速器

2005 年には AGS 加速器に Cold Snake が導入された。2005 年のテストでは偏極度は上がらなかったものの、2006 年の加速器実験の結果、AGS 加速器出射エネルギーにおける平均偏極度は 65% を達成した。

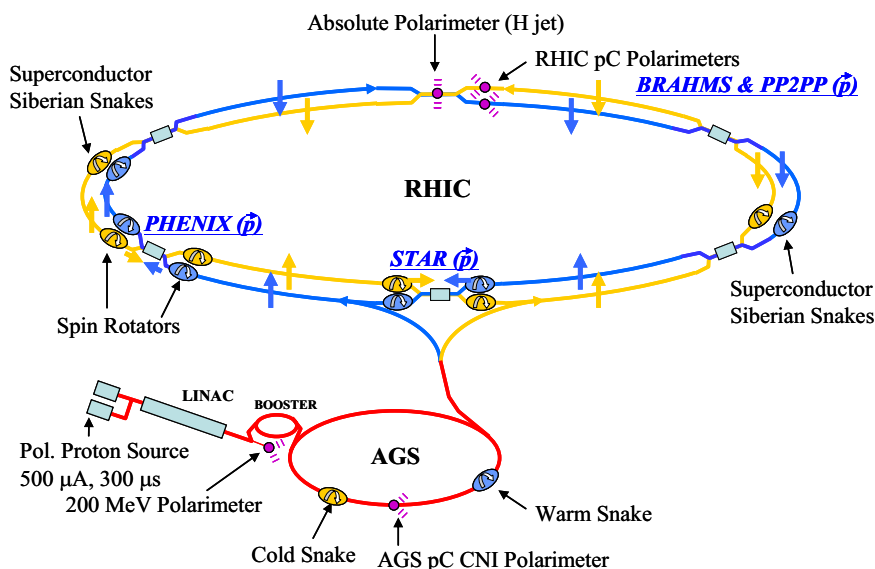


図 AP1-4:2005 年および 2006 年の BNL 加速器

## 付録 2

参考にしたヘリカルダイポールの模型を図 AP2-1 に示す。鉄芯の断面形状が四角であるため、電磁石の外側でもねじれ構造がわかる。しかしながら、実機を製作するにはこの形状では高い精度で組み立てることが困難である。また、加速器に設置する際の架台も電磁石両端だけで支える構造になってしまう。したがって、軽量の模型は製作可能であるが、この時点では実機製作には様々な工夫が必要であった。

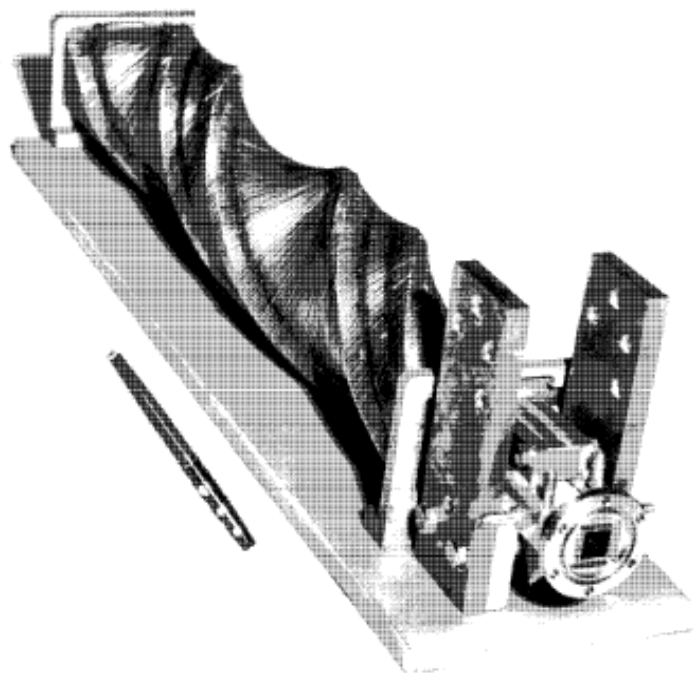


図 AP2-1:ヘリカルダイポールの模型

### 付録 3

ここでは Warm Snake の設計図を示す。図 AP3-1 は Warm Snake の全体設計図である。

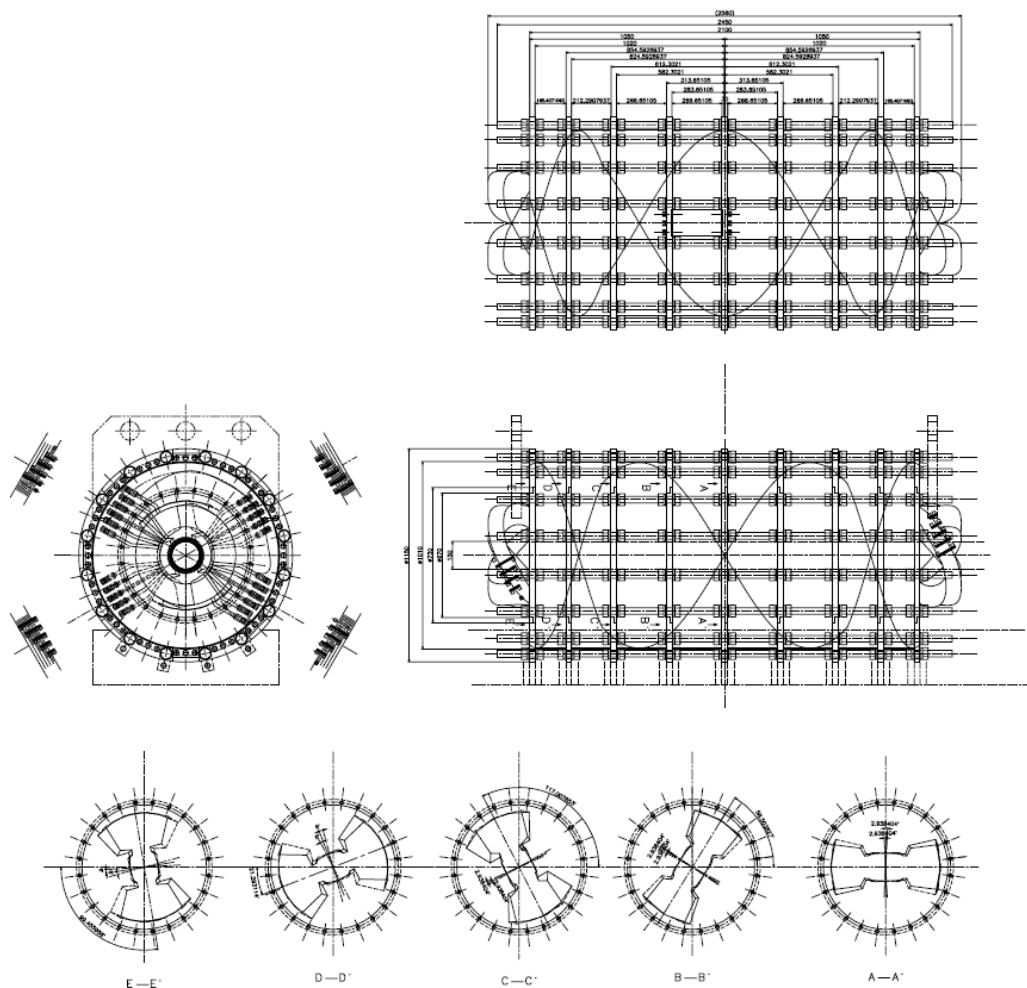


図 AP3-1: Warm Snake 全体の設計図

このように三次元磁場計算で得られた最適なヘリカルピッチに合わせて固定用鉄板を回転させた。また、第 4 章で述べたようにヘリカルピッチによってコイルの断面積が異なるため、固定用鉄板の設計も Slow pitch 用と Rapid pitch 用で異なる。図 AP3-2 および図 AP3-3 に Slow pitch および Rapid pitch で用いる固定用鉄板の設計図を示す。

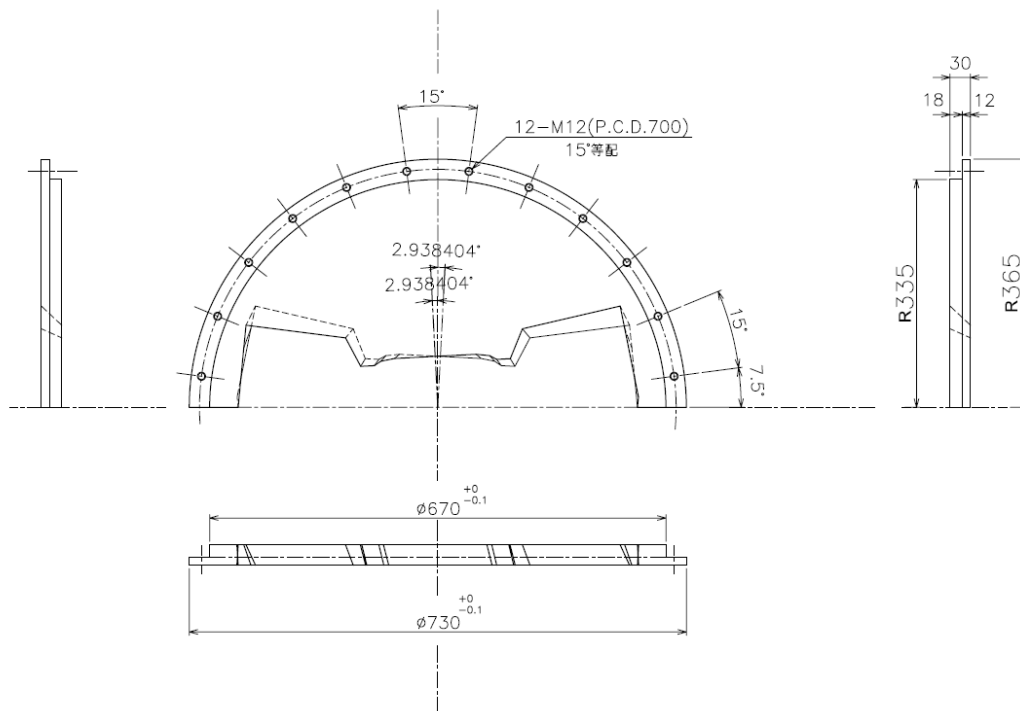


図 AP3-2: Slow pitch に用いる固定用鉄板

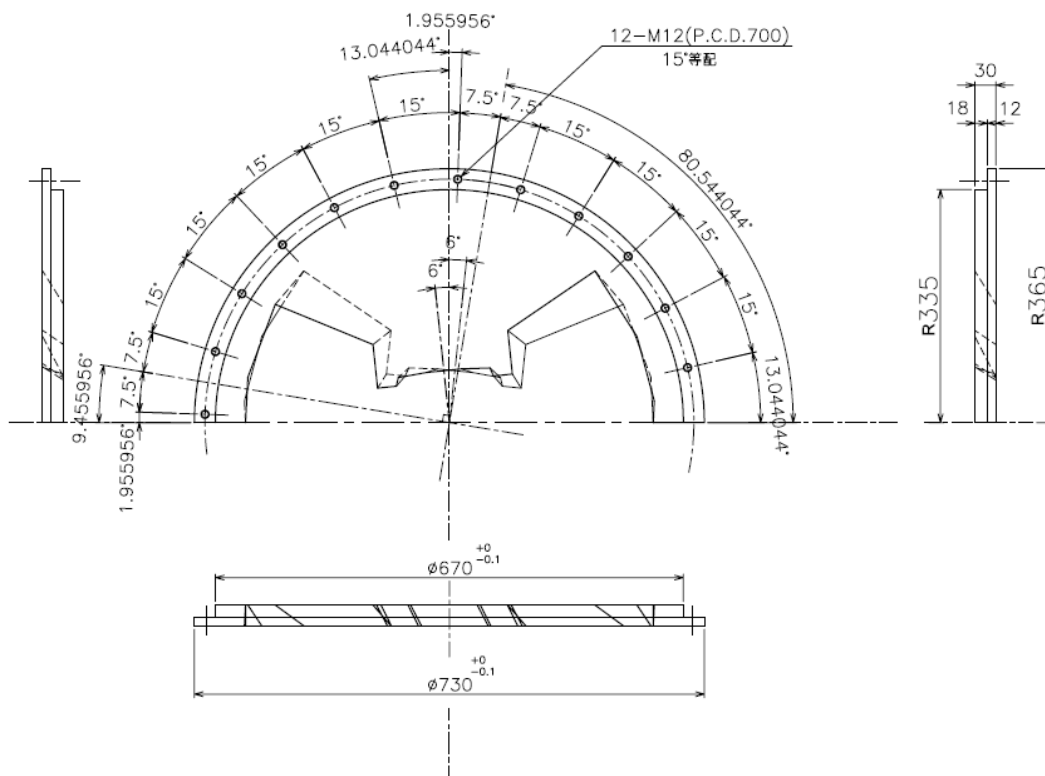


図 AP3-3: Rapid pitch に用いる固定用鉄板

## 付録 4

ヘリカルコイルの巻線過程と鉄芯の組み立て過程について、論文内で取り上げなかった写真を補足として順番に示す。図 AP4-1 は巻型に最も近い層を巻いたときの写真である。



図 AP4-1:巻型に最も近い層のコイルの巻線終了時

このように、コイルの巻線は巻型に一番近い層である両端から順番に内側へコイルを重ねていった。巻線終了後、ヘリカルコイルは外周をガラステープと綿テープを巻き、エポキシ樹脂で固めた。



図 AP4-2:エポキシ樹脂で固められているヘリカルコイル

完成したヘリカルコイルは垂直に立てられ、鉄芯が組み込まれた。図 AP4-3 は上半分の鉄芯を積み上げている途中の写真である。



図 AP4-3:鉄芯の組み立て



図 AP4-4: Slow pitch と Rapid pitch の変換点

ヘリカルピッチの変換点は図 AP4-4 のようにヘリカルガイドを用いることによって三次元磁場計算で得た最適なヘリカルピッチを再現した。



図 AP4-5:積み上げられたケイ素鋼板



図 AP4-6: 半分の鉄芯が完成した後、上下逆さまにしたときの写真  
図 AP4-3 のように電磁石中央から上半分のケイ素鋼板を積み上げた後、電磁石は上下逆さまにされ、残り半分の鉄芯を積み上げた。

Warm Snake はBNLの加速器に導入され、偏極度の向上に成功した。その際の評価をここで示す。

# the Bulletin

BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

## AGS Beam Runs Through Warm Snake 50 percent polarized proton beam measured in tests

### Get to Know Snakes, Polarized Protons

**Snakes**  
Snake magnets get their name from the snake-like undulation of the beam as it travels through the lattice or bending horns of the magnet. The original idea of snake magnets was invented at the Brookhaven Institute of Nuclear Studies in Stony Brook, New York, where the late "Siberian" snakes, Precision Integral Vector magnet have been superconducting magnets which have to be kept at very low temperatures. The recently installed snake at the Alternating Gradient Synchrotron two stories high needs no superconducting to work, in by contrast, it is "warm."

**Polarized Protons**  
One of the fundamental properties of the proton particle is its spin or angular momentum. To study how this angular momentum is distributed among the quarks and gluons that make up the proton, scientists can use beams of polarized protons accelerated to high energy around a ring. A beam of polarized protons is a beam of protons with the majority of their spins pointing in the same direction. Snakes help with the spin of the protons in the beam every revolution in such a way as to eliminate depolarization at certain stages, called "resonances," which occur during acceleration. So, by sending a beam of polarized protons through a snake magnet, more of the protons stay polarized and experiment results are easier to obtain. — L.K.

BNL beam recently installed a warm, helical Warm Snake (see text, left), among other magnets in the Alternating Gradient Synchrotron (AGS). Designed by Masamichi Okumura of RIKEN and Junpei Takano of the Tokyo Institute of Technology, and built by the Tokai Engineering Magnet Company in Japan, the magnet's initial test measurements have proved its success. Said Vladimir Makny of the Collider Accelerator Lead Department, who is manager of the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) Spin Project, "This magnet, which is one-of-a-kind, will help upgrade the quality of the beam of protons delivered from the AGS into RHIC for experiments in proton spin physics."

In RHIC, Mackay explained, BNL has pioneered and developed the unique capability to collide polarized protons (see box, left) at high energy.

"This part of the RHIC program is just starting and should produce exciting new results in understanding the structure of the proton," Mackay said. "The warm snake story began a little over a year ago, when Thomas Roper of CEA proposed building the snake. The new helical snake was expected to minimize the depolarization from coupling resonances as the beam of polarized protons accelerated around the AGS ring before entering RHIC. It would replace the older solenoid snake magnet in the AGS, which also provided polarization, but had other disadvantages.

"The RIKEN designed and produced the final product in record time," said Mackay. "The magnet was delivered to BNL at the end of October." The snake magnet was first set up in the Superconducting Magnet Division, where a detailed series of measurements of electrical properties and magnetic field were made and completed in January.

"These measurements were made by Sagner team led by George Fanelli and Andrew Mackay verified the model calculations with the measurements and adjusted mechanical shims to compensate the field at the ends of the magnet.

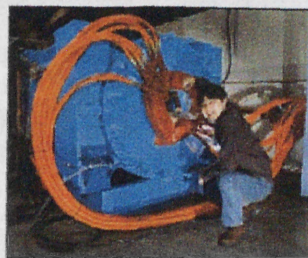


Photo of the new warm helical snake magnet is shown taken at the Tokyo Institute of Technology, who designed the magnet with Masamichi Okumura of RIKEN. Built by the Tokai Engineering Magnet Company in Japan, the new snake was handed by RIKEN.

"Once the adjustments were made, we installed the magnet in the AGS tunnel during February," Mackay continued. "After three days and others in the machine had built and installed a new proton supply for the snake in the AGS. After a few short periods to adjust the power supply with the snake, we were ready to try the snake with beam."

Thomas Roper's "Woody" Glenn K-50, with some sage advice from Okumura, turned up the AGS to inject and accelerate protons with the new snake magnet," said Mackay. "This compact snake, which has a single power supply, can cause large distortions of the orbit, if the snake and the AGS are not set up properly."

Everything went well. "Most recently, we have gotten some measurement showing that the snake is working. With a little more testing of the AGS, we have measured polarization around 50 percent for injection into RHIC. This snake appears to work very well," Mackay said. However, the Warm Helical snake is not the end of the story. "We are building an additional, even stronger helical snake that is superconducting," said Mackay. In combination with the warm snake, an unprecedented 70 percent polarized beam will be possible to RHIC for the spin physics program. — L.K. (www.bnl.gov)

図 AP5-1: BNL の所内新聞一面に掲載された Warm Snake

このように、Warm Snake によって偏極度が向上したことが発表された。同様の記事は理化学研究所の「研究成果」および東京工業大学の学内新聞「クロニクル」にも掲載された。

その後、米国エネルギー省に提出された BNL におけるスピン物理研究の 5 年計画書の表紙にも選ばれた。

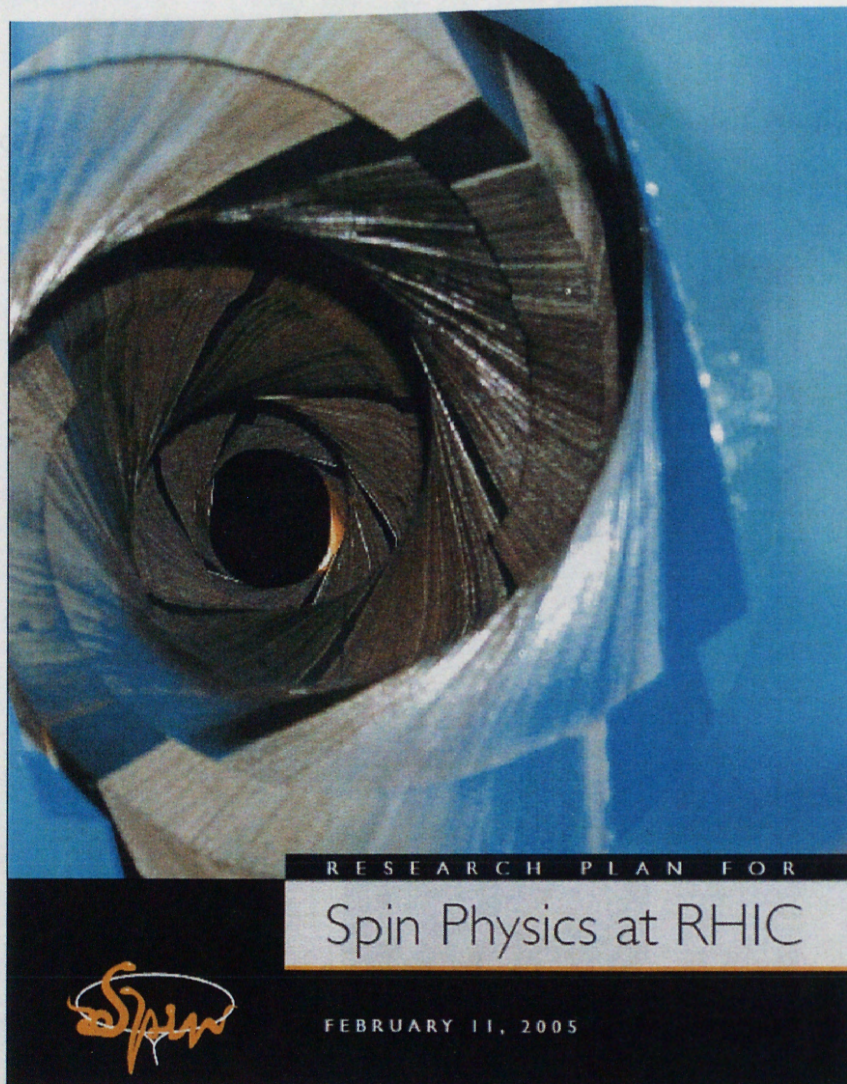


図 AP5-2: スピン物理研究の5カ年計画書の表紙に選ばれたヘリカルダイポール