

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	自由表面液体リチウムターゲットを用いる加速器の真空特性に関する実験的研究
Title(English)	Experimental study on the vacuum characteristics of a particle accelerator using a free-surface liquid lithium target
著者(和文)	蛭沢貴
Author(English)	Takashi Ebisawa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第362号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:林崎 規託,赤塚 洋,片淵 竜也,筒井 広明,長谷川 純
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第362号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	蛭沢 貴		審査員主査： Chief Examiner

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「自由表面液体リチウムターゲットを用いる加速器の真空特性に関する実験的研究」と題し、液体 Li (リチウム) ターゲットから発生する Li 蒸気やガスの流入抑制を図るビームライン設計及び各所の要求圧力を維持する真空設計、さらに液体 Li 流動環境下における加速器とターゲット境界の差圧の維持の実証及び加速器の真空特性への影響を実験的に評価したものである。

自由表面液体 Li ターゲットは、高い中性子発生量、ビーム熱負荷低減、ターゲット物質の交換が不要であるなどの利点から、国際核融合材料照射施設 (IFMIF) 及び量研が計画している核融合中性子源 (A-FNS)、ホウ素中性子補足療法 (BNCT)、核変換等の大強度中性子源加速器への利用が検討されている。ただし、加速器は性能を維持するため 10^{-5} Pa 以下の超高真空、Li の沸騰防止のため液体 Li ターゲットとの接続部は 10^{-4} Pa 台以上の圧力を維持する必要がある。大強度中性子源加速器は、数 $10\sim 100$ mA 級の大電流ビームを取り扱うことに起因する大きな空間電荷効果により大口径のビームダクトで構成されるため、差圧維持の可否や Li 流入が問題視されている。また、さらなるビーム出力の大強度化の必要性から、超伝導高周波加速器 (SRF) を用いる設計も検討されているが、液体 Li ターゲットから SRF に流入する蒸気や汚染ガスによる性能劣化が懸念されている。SRF を用いる場合、清浄かつ 10^{-6} Pa (理想的には 10^{-7} Pa) 以下の超高真空を維持しなければならない。そこで本論文は、Li 流入を抑制可能とし各所の要求圧力の維持を可能とするビームライン設計の確立及び真空設計と、液体 Li 流動による真空特性の変化が加速器側に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

加速器設計の適用例として、125 mA の重陽子ビームを SRF で 40 MeV まで加速し、液体 Li ターゲットに照射する A-FNS の高エネルギービーム輸送系 (HEBT) を選択した。これまで HEBT は、SRF と液体 Li ターゲットの間を 9 度だけ浅く偏向する設計であったが、液体 Li ターゲットから発生する蒸気やガスの逆流をより抑制するため、60 度で二度偏向するドッグレック型ビームライン設計を検討した。電磁石の配置・磁場強度及びビームダクト径を、PIC (Particle-in-Cell) シミュレーションコード TraceWin を用いて設計した。さらに、SRF 接続部を 10^{-7} Pa 以下、HEBT 全体的に 10^{-5} Pa 以下、液体 Li ターゲットとの接続部は 10^{-4} Pa 以上を維持するための真空設計を、モンテカルロシミュレーションコード Molflow+を用いた解析により行った。

この真空設計による差圧を液体 Li 流動環境下で実証し、さらに液体 Li ターゲットからのガス放出による圧力変動や蒸気流入量等の真空特性の運転温度・流速依存性を実験的に検証するため、真空配管と液体 Li ループシステムを組み合わせて、加速器-ターゲット境界を模擬する試験体系を設計した。ビーム方向は実機の約 1/10 スケールだが、配管の構成比とコンダクタンスは実機に近い設計とした。HEBT 模擬側を 10^{-5} Pa 以下、液体 Li ループシステム側を 10^{-4} Pa 以上とする差動排気系を設計し、さらに真空計・膜厚計・残留ガスモニタ等を設置し、真空特性を評価できる試験装置を開発した。

実際に液体 Li 流動環境下で、到達圧力はそれぞれ、液体 Li ループシステムは 10^{-2} Pa 台、HEBT を模擬する配管は想定より大きい 10^{-4} Pa 台となったが、2 桁の差動排気を実証した。液体 Li のパラメータ依存性を調べるため、温度 (220, 250 °C) ・流速 (13, 16, 18 m/s) を変化させながら真空計で圧力分布を測定したが、パラメータ依存性がないことが確認された。スルーブット法で液体 Li ターゲットからのガス放出率を 3.4×10^{-5} Pa m^3/s cm^2 と評価し、通常の使用環境の真空配管より 3~4 桁程度高い値であった。さらに、残留ガスモニタによる分圧の測定から Li_4 と推定される質量数 28 の成分が優勢であることが判明し、分圧スペクトルも運転パラメータ依存性がないことが確認された。

一方、膜厚計による Li 流入量の測定では、温度が高い場合は流入量が増加し、流速が大きい場合は流入量が減少する傾向にあることが実験的に確認された。液体 Li ターゲットからの距離依存性については、指数関数的減少が見られ、従来の逆二乗則に比例するという傾向と異なる結果となった。また、膜厚計の測定位置を変え液体 Li 流動面を直視しない位置では、流入量を 2 桁程度抑制できることを確認し、ドッグレック型ビームラインの有効性を評価した。走査電子顕微鏡による膜厚計の付着物の観察で、数百 nm から数 μm の微粒子、1 mm 程度以下の液滴が確認された。さらに、元素分析で Li 化合物であることを示唆するピークも確認された。このことから、液体 Li 流動面で生成された Li は蒸気及び微粒子・液滴の状態では加速器真空環境に流入すると結論付けられた。真空計で検出不可能な微粒子や液滴が Li パラメータ依存性及び距離の指数関数的な減少に寄与していると考察した。

結論として、本研究で得られた結果を総括するとともに、自由表面液体 Li ターゲットを有する大強度中性子源加速器の実現に必要な知見についてまとめた。

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	蛭沢 貴		審査員主査： Chief Examiner	林崎 規託	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

A free surface liquid lithium (Li) target system is designed for various usages of a high intensity particle accelerator-based neutron source. The target system can produce large neutron flux and relieve a thermal load of the high current beam. However, large differential required pressure should be kept the interface of the particle accelerator system and the Li target system. In order to realize the dedicated particle accelerator and vacuum system, the beamline designed for minimizing Li inflow and experimental studies on the demonstration of differential pumping under liquid Li flowing and estimation of vacuum characteristics were conducted. As an actual particle accelerator for consideration, IFMIF/A-FNS HEBT system for handling 125 mA/40 MeV D⁺ beam was treated.

For minimizing Li inflow from target system, an HEBT with dogleg type beam line was designed by beam simulation with PIC (Particle-in-Cell) simulation code. Also, an experimental mockup of the interface of the HEBT and Li target system to satisfy the required pressure difference were designed and prepared. The vacuum characteristics were detected by vacuum gauges, thickness monitors and gas monitors. Experimentally, differential pumping between 10⁻² Pa and 10⁻⁴ Pa with Li flowing was confirmed. Outgas rate was estimated 3.4×10⁻⁵ Pa m³/s cm² with the main gas of Li₄ (Mass 28) which is larger than typical value of vacuum ducts. The pressure distribution and outgas did not depend on operational parameters of the Li target. On the other hand, Li deposition rate showed a positive correlation for temperature and a negative correlation for flow velocity. In addition, the Li deposition rate decreased two orders by bending the beam duct. By SEM (Scanning Electron Microscope) measurement on the surface of used thickness monitors, Li vapor was observed as a micron particle and droplet.

In conclusion, the differential pumping under Li flowing was confirmed using the experimental mockup, and the vacuum characteristics and the behavior of Li vapor were discussed.