

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)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	蛭沢 貴	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	林崎 規託	教授	長谷川 純	准教授
	審査員	赤塚 洋	准教授		
		片淵 竜也	准教授		
筒井 広明		准教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本研究は、「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、全 6 章から構成されている。

第 1 章「序論」では、自由表面液体リチウム (Li) ターゲットが、高い中性子発生量、ビーム熱負荷冷却および中性子発生ターゲットの交換が不要であるなどの利点から、日欧で開発が進められている国際核融合材料照射施設 (IFMIF)、量子科学技術研究開発機構が計画している核融合中性子源 (A-FNS)、ホウ素中性子捕捉療法や核変換などの大強度加速器駆動型中性子源への利用が検討されており、加速器は性能を維持するために  $10^{-5}$  Pa 以下の超高真空が必要なものに対して、Li の沸騰防止のためターゲット側は  $10^{-4}$  Pa 以上の圧力が求められることを指摘している。そして、本論文研究の目的が、自由表面液体 Li ターゲットを用いる大強度加速器駆動型中性子源を実現するために、加速器とターゲット間の差圧を維持するビームラインの設計と模擬体系による実証試験をおこない、液体 Li 流動による真空特性の変化が加速器に及ぼす影響を解析と実験の両面から評価するものであることを述べている。

第 2 章「原理」では、真空工学に関する基本的な原理、加速器の超高真空システム設計における留意点、特に超伝導線形加速器 (SRF) を用いる場合は清浄かつ超高真空の環境が必要であること、また、Li の性質とターゲットシステムの原理について概説するとともに、IFMIF や A-FNS などの自由表面液体 Li ターゲットを用いる加速器の設計課題について言及している。

第 3 章「Li 逆流抑制を考慮したビーム輸送系の設計」では、液体 Li ターゲットからの Li 逆流抑制を目的としたビームライン設計モデルとして、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) を選択している。本研究では、この HEBT に対して 60 度で二度偏向するドッグレッグ型ビームラインを新たに設計し、ビームシミュレーションと真空モンテカルロシミュレーションを通じて、加速器と液体 Li ターゲットの圧力差を維持しながら、SRF までの Li 蒸気逆流量を年間  $2.89 \times 10^{-18}$  g に抑制できる計算結果が得られたことを述べている。

第 4 章「液体 Li 流動と差動排気の試験体系の設計」では、第 3 章で設計した HEBT を液体 Li 流動環境下で実証し、液体 Li 表面からのガス放出による圧力変動や蒸気流入量などの液温・流速依存性を実験的に研究するため、その最終コリメータ部と液体 Li ターゲットの境界部に関して、長さが実機の 1/10 スケールである約 1.6 m、配管径が実機の 1/3 スケールの差動排気試験体系を設計製作し、小型の Li 蒸気発生装置を用いて真空計、膜厚計および残留ガスモニタの事前試験をおこない、真空中での Li 蒸気の定量的評価と識別が可能であることを確認している。さらに液体 Li ループシステムとの接続前に加速器模擬配管を用いて  $10^{-3}$ ~ $10^{-5}$  Pa の差動排気効果が得られたと述べている。

第 5 章「実証試験及び真空特性評価」では、第 4 章で設計製作した差動排気試験体系と液体 Li ループシステムを組み合わせ、液体 Li 流動環境下での到達圧力が、液体 Li ターゲット側は  $10^{-2}$  Pa 台、HEBT 側は  $10^{-4}$  Pa 台となり、2 桁の差動排気効果を実証したことを述べている。また、運転パラメータ (液温 220, 250°C、流速 13, 16, 18 m/s) を変化させた条件で圧力分布を測定して依存性がないことを確認し、スルーポット法で液体 Li ターゲットからのガス放出率を  $3.4 \times 10^{-5}$  Pa m<sup>3</sup>/s cm<sup>2</sup> と評価している。さらに、残留ガスモニタによる分圧測定から Li<sub>2</sub> と推定される質量数 28 の成分の影響が大きいことを明らかにし、分圧スペクトルにも運転パラメータ依存性がないことを確認している。膜厚計による Li 流入量の測定では、液温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、その距離依存性については指数関数的な減少がみられ、従来の逆二乗則に比例する傾向と異なっていたことを述べている。膜厚計の表面には、走査型電子顕微鏡により数百 nm から数  $\mu$ m の微粒子、1 mm 程度以下の液滴が存在し、エネルギー分散型蛍光 X 線分析では Li 化合物であることを示唆するピークを確認している。これらの結果より、液体 Li 表面から飛び出した Li が蒸気と微粒子・液滴の混合状態で HEBT に流入し、真空計では検出不可能な後者が Li パラメータ依存性や距離の指数関数的な減少に寄与している可能性があると考えられている。

第 6 章「結論」では、各章において得られた結果を総括し、本論文の結論としている。

これを要するに、本論文は、自由表面液体 Li ターゲットを用いる大強度中性子源加速器の実現に必要な技術を開発し、その真空特性について実証試験を通じて検証したことにより、加速器工学の分野に新たな知見を与えたものであり、今後の実用システムとしての安全性・安定性・保守性を向上し、工学上及び工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分価値あるものと認められる。