

研究成果展開事業

研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)

「産業ニーズ対応タイプ」

技術テーマ

「コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築」

完了報告書

研究課題名「産業用コンパクト中性子源陽子加速器システムの小型化開発」

令和元年 5 月 31 日

プロジェクトリーダー

機関名：国立大学法人 東京工業大学

氏 名：林崎 規託

I. 研究計画の概要

1. 研究の目標

加速器技術の発展にともない、従来の電子線、イオン、X 線に加えて、中性子やミュオンなどの量子ビームをプローブとした、物質構造の観察や新しい科学現象の解明に、社会の期待が寄せられている。例えば、東工大においても透過力が強く軽元素に対する感度が高い特徴をもつ中性子分析や中性子照射改質などのニーズは大きいものの、中性子を手軽に利用できるポータル施設が学内に存在しないため、電子顕微鏡や X 線分析装置などに比べると中性子利用のハードルは高かった。

我が国における中性子利用は、日本原子力研究所(日本原子力研究開発機構)や大学の研究用原子炉(研究炉)を中心に、北海道大学や東北大学などのパルス加速器中性子源、また、高エネルギー加速器研究機構の核破砕パルス中性子源施設 KENS の利用によって、長年進められてきた。その後、社会情勢の変化や維持管理負担の問題により大学設置の研究炉は廃炉が続き、他方、加速器中性子源については、2008 年から J-PARC における中性子利用がスタートし、既存の小型加速器中性子源との相補的な利用が期待されている。

近年の興味深い動きとしては、理化学研究所 RANS、京都大学 KUANS、名古屋大学 NUANS など、大学や研究機関を中心に陽子線ベースの小型加速器中性子源の運転開始または建設が進んできている。しかし、その加速器部分は静電型や高周波型に関わらず、いずれも海外からの輸入製品となっており、オンデマンド・サポートの体制に不安が残ると聞いている。加速器が輸入製品であったとしても、中性子利用の普及および需要創出の観点からは好ましいことであるが、我が国の産業競争力の維持・向上の観点からは改善が必要である。また、小型といえども設計・製作・運転の全段階に専門家の関与が不可欠な「F1 マシン」であり、導入場所が大学や研究機関だからこそ実現できたと考えられる。

このような状況のもと、本プログラムの技術テーマ「コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築」を達成する研究課題として、本研究開発は「小型中性子源の早期商品化」に必須と考えられる「加速器システムの小型化」に取り組む。小型中性子源のデファクトスタンダードが存在しない現在の状況での商品化の方向性としては、①大量に中性子を発生可能なハイパワーマシンと、②手軽に導入可能なエントリーマシンの 2 タイプが考えられるが、ハイパワーマシンについては当面のあいだ既存の中性子施設を活用してもらい、本研究開発では企業や大学などが導入しやすい加速器駆動型エントリーマシンの小型化開発をおこなう。

加速器駆動型中性子源に用いられる代表的な中性子生成反応としては、陽子線による ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 、 ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ 、電子線による光核反応などがあり、それぞれ実用的な 1 次ビームの加速エネルギーは、2.3MeV 以上、7MeV 以上、30MeV 以上といわれている。本研究開発では、条件によってはシンプルな中性子生成ターゲットを構成できること、さらに、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律および関係政省令の 2005 年 6 月改正施行によって、橋梁の非破

壊検査については比較的簡単な手続きで 4MeV 未満の直線加速装置の移動使用が可能になったことも踏まえて、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ を選択する。また、リチウムの反応断面積、加速器の小型化、中性子遮蔽の容易さを考慮して、陽子線の加速エネルギーは 2.3~2.5MeV とする。中性子モデレータについては「産学共創の場」を活用しながら検討する。

陽子加速器の方式としては、エネルギー安定性の点では静電型が好ましく、核データ測定用やホウ素捕捉中性子療法(BNCT)用の中性子源として利用された例もあるものの、温室効果ガスの SF_6 ガスとその貯蔵およびハンドリングシステムを必要とし、規模も大がかりになるため、小型化には適さない。本研究開発では高周波四重極(RFQ)線形加速器を選ぶが、運転周波数が 200MHz の一般的な RFQ 線形加速器で 2.5MeV の陽子を加速するには 3m 以上の長さを必要とするため、周波数を 650MHz に変更して小型化を図るとともに、製作方法も 3 分割構造型を採用して高性能化かつ低廉化を実現する。

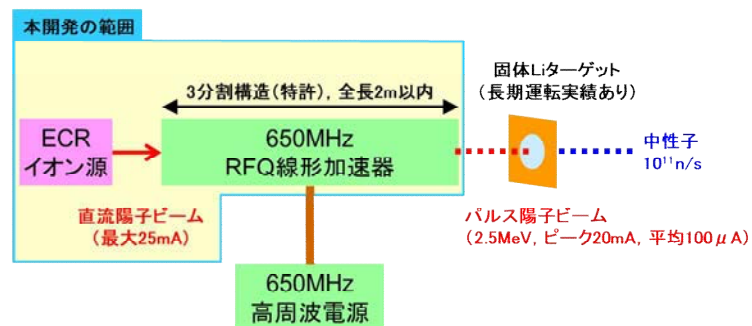
リチウムターゲットの方式としては固体型と液体型があり、ビームパワーの大きさとその冷却方法によって使い分けされるが、本研究開発ではエントリーマシンとしての位置付けから、銅薄板にリチウム膜を蒸着させたシンプルなターゲットを採用する。この方式は、東京工業大学(東工大)において中性子核データ測定用として 40 年近い利用実績があることから、本研究開発の範囲には含めない。陽子線の最大平均強度は $100\mu\text{A}$ (ピーク強度 20mA) を目標とし、このときのビームパワーは 250W、発生する中性子量は 10^{11}n/s である。陽子イオン源としては、大強度陽子ビームを容易に生成でき、構造もシンプルで壊れにくい、電子サイクロトロン共鳴(ECR)型を用いる。

以上より、本研究開発で新しく開発する産業用小型加速器中性子源の目標性能を表 1 に、開発終了時に得られる予定の産業用小型加速器中性子源のイメージを図 1 に示す。また、「陽子加速器システムの小型化開発」として取り組む技術課題を表 2 にまとめる。得られる研究成果は、中性子利用の幅広い可能性を考慮すると、我が国の産業界の川上から川下にわたって競争力の維持・向上に寄与すると思われる。例えば、図 2 に示す中性子橋梁非破壊検査システムのように移動式の場合は、小型化のメリットが最も発揮されるであろう。

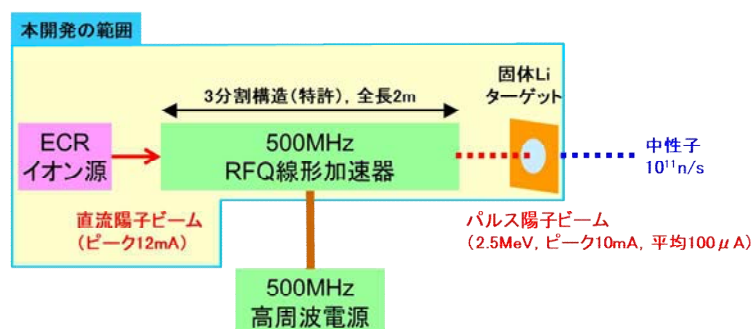
ただし、本研究開発では新しく開発した加速器単体の性能に関する実証試験はおこなうものの、ビーム加速および中性子生成の実証試験は、商品化を希望する企業との産学連携により技術移転促進プログラムのなかで実施するものとし、研究開発範囲には含めない。なお、ビーム加速および中性子生成の実証試験が可能な放射線管理区域を有する実験施設に関しては、東工大大岡山キャンパスのなかに確保されている。

表 1 本研究開発で新しく開発する
産業用小型加速器中性子源の目標性能

パラメータ	目標
イオン源のタイプ	2.45GHz ECR イオン源
加速器のタイプ	RFQ 線形加速器
加速ビーム	陽子
運転周波数	650MHz
加速エネルギー	2.5MeV
ビーム強度	平均 100 μ A (ピーク 20mA)
加速器全長	2m 以内 (イオン源部分は含まず)
ターゲット方式	固体リチウム
中性子強度	10 ¹¹ n/s



本事業開始時



中間評価後

図 1 本研究開発の開発終了時に得られる予定の小型加速器中性子源のイメージ

表 2 本プログラムの技術テーマ実現に向けた本研究開発の取り組み

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">①RFQ 線形加速器の運転周波数変更による小型化②RFQ 線形加速器を 3 分割構造型とすることによる高性能化③RFQ 線形加速器をアルミニウム母材に銅メッキを施して製作することによる軽量化④前述の①～③の取り組みによる製作費の低廉化 |
|--|



図 2 中性子橋梁非破壊検査システムの構想図^[1]

[1] 大竹淑恵、須長秀行、橋梁構造物に関する非破壊検査、JACIC 情報、110 号、(2014) 62-69.

2. 研究実施予定表 非公開

3. 研究費 非公開

Ⅱ. 研究成果の創出状況

4. マイルストーンの達成状況

CP	内容	達成状況
【CP1】	650MHz-RFQ 加速空洞の設計として、ビーム軌道解析と高周波電磁場解析によって、運転周波数 650MHz、全長 2m 以内の条件下で、加速エネルギー 2.3～2.5MeV、陽子ビームピーク電流 20mA の設計結果が得られていることを確認する。(平成 28 年 9 月)	650MHz-RFQ 加速空洞の設計として、ビーム軌道解析コード「LIDOS RFQ Designer Complete Professional」と、3 次元高周波電磁場解析ソフトウェア「CST STUDIO」を用いた連成解析を実施した結果、運転周波数 650MHz、加速エネルギー 2.5MeV、陽子ビームピーク電流 20mA、全長 2m を満たす結果が得られた。平成 28 年 7 月に 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology、同年 8 月に第 13 回日本加速器学会年会において発表した。(達成率 100%)
【CP2】	2.45GHz-ECR イオン源のビーム試験によって、ピーク電流 25mA の陽子ビームが出力されることを確認する。(平成 30 年 3 月)	ビーム電流値の測定精度を向上するためにファラデーカップの改良をおこない、水素ガス流量、マイクロ波パラメータ、コイル電流量などの条件を変化させながら陽子ビームの引き出し実験を進めた結果、デューティ 1.0% 運転の場合に必要とされるイオン源ピーク電流 12mA の陽子ビーム電流を安定に取り出せる性能を確立した。(達成率 100%)
【CP3】	650MHz-RFQ 加速空洞を製作し、ネットワークアナライザを用いたローレベル高周波試験によって、加速空洞の共振周波数が 650MHz、無負荷 Q 値の計算値に対する再現性が 90% 以上であることを確認する。(平成 30 年 3 月)	サイトビジットにおいて指摘を受けた運転周波数の変更について検討後、中間評価会で運転周波数を 650MHz から 500MHz に変更するとともに、運転デューティを 1.0% に引き上げて陽子ピーク電流を 10mA に抑える提案をおこない承認を得たので、3 分割構造型の 500MHz-RFQ 加速空洞の実機プロトタイプ

		イプの設計製作をおこなった。低電力高周波特性試験により無負荷 Q 値の計算値に対する再現性は 85%であった。(達成率 95%)
--	--	---

5. 研究計画全体の進捗状況

①研究目標や計画の変更について

研究目標に関する変更は生じなかった。また、その他の内容についても大きな計画変更なく進められた。

②技術テーマの解決への寄与

本研究で開発した装置と、理化学研究所において現在運転中の小型加速器中性子源 RANS、同じく開発中の RANS2 について、加速器仕様を中心に比較した表を以下に示す。

	理研 RANS	理研 RANS2	本研究 (当初)	本研究 (最終)
中性子発生ターゲット	固体 Be	固体 Li	固体 Li	固体 Li
中性子生成量 [n/s]	10^{12}	10^{11}	10^{11}	10^{11}
運転周波数 [MHz]	425	200	650	500
陽子の加速エネルギー [MeV]	7	2.49	2.49	2.49
イオン源出力電流量	20-25	12	25	12
加速器出力ピーク電流量 [mA]	12	10	20	10
加速器出力平均電流量 [μ A]	100	100	100	100
パルス幅 [μ s]	10-180	< 1100	< 100	< 100
パルス繰り返し [pps]	10-180	10-180	< 100	< 100
ビームパワー [W]	700	250	250	250
高周波電源	真空管式	半導体式	半導体式	半導体式
運転効率(デューティ) [%]	1.3	3.3	0.5	1.0
加速器全長(イオン源含む) [cm]	450	350-400	< 300	< 280
RFQ 加速空洞断面積(概算) [cm^2]	1850	2000	225	620
メーカー	海外	国内	設計のみ	国内

RANS は 7MeV の陽子とベリリウムターゲットを用いることで 10^{12}n/s オーダーの中性子量を実現するが、2 種類の加速器から構成され全長が最も大きく、真空管式の高周波電源を用いているため保守管理の苦労もある。とくに大出力真空管の価格上昇と製造中止リスクについては、粒子線がん治療用加速器の分野においても懸念されており、産業用小型加速器中性子源としても極力避けるべきである。

その運転経験を踏まえて計画された次世代タイプが RANS2 である。これは 2.5MeV の陽子とトリチウムターゲットを用いることで 10^{11}n/s オーダーの中性子量を実現するものであり、中性子ターゲットの見直しによって全長は大幅に短縮されたが、加速器の運転周波数が 200MHz であるため、

重量だけでなく室内における装置としての存在感も大きい。

本研究において開発に取り組んだ小型加速器中性子源は、RANS2 と同等の中性子量を、加速空洞のボリュームとしては約 1/4(運転周波数 500MHz の場合)の大きさで実現するものであり、半導体式の大電力高周波電源により長期メンテナンスフリーを実現することで、技術テーマの解決に貢献する。そして「産学共創の場」や「サイトビジット」において、平成 28 年度に製作した運転周波数 650MHz のコールドモデルを実際に目にした方々より、「小型化のインパクト」や「実用化を期待する」というコメントを多数頂戴した。

なお、当初予定していた運転周波数 650MHz の半導体式大電力高周波電源は先例がないことから高価格が懸念され、平成 29 年度の「サイトビジット」において高周波電源の低廉化を目指した運転周波数の変更について指摘があったことから再検討を進め、運転周波数 500MHz では加速空洞の断面積が増えるものの、全長を短縮できる見通しを得た。この結果をもとに、平成 29 年 11 月に実施された中間評価会で実機プロトタイプ運転周波数を 650MHz から 500MHz に変更するとともに、運転デューティを 1.0%に引き上げて陽子ピーク電流を 10mA に抑える提案をおこない承認が得られた。今後については、加速空洞と高周波電源のコストダウンの相乗効果に加えて、量産化効果も期待されることから、最終的にはハイスpekクな NMR(核磁気共鳴)装置や TEM(透過型電子顕微鏡)と同程度のプライスゾーンで展開していくことを目指している。

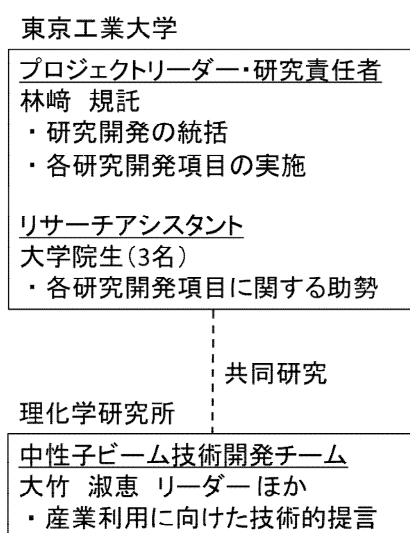
また、中性子発生量が 10^{11} n/s オーダーになってしまう点については、これまでの「産学共創の場」の「中性子フラットパネルディテクタの研究開発」課題報告のなかで、東京大学の高橋教授より Glass GEM を使った ver2 では 1 桁高感度になることが示唆されており、その後の PO コメントでも言及されていたように、本プログラム課題のシナジー効果により解決していきたい。

③産業力強化に資する基礎的な研究としての新たな知見の創出

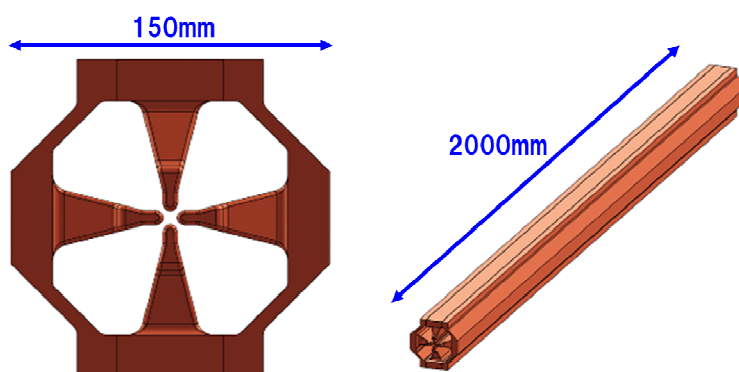
運転周波数が 500MHz および 650MHz かつ 3 分割構造型の RFQ 線形加速器の開発は世界初の取り組みであり、これを用いた小型加速器中性子源のもつポテンシャルを、シミュレーションおよび実機プロトタイプ的设计製作により明らかにした。

6. 研究実施状況

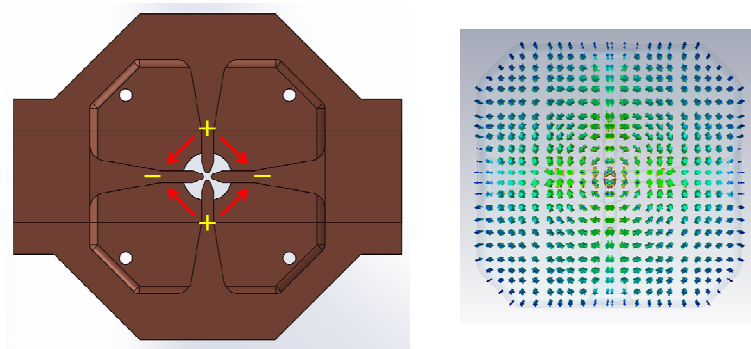
本研究は、東京工業大学により単独実施され、プロジェクトリーダー(科学技術創成研究院・林崎教授)とリサーチアシスタント(大学院生)が参画した。したがって、他機関への研究費の配分はなかった。また、東京工業大学と理化学研究所は、平成 26 年 6 月に「普及型加速器中性子源の開発」の共同研究契約を締結し、小型中性子源用加速器の開発や中性子実験に共同で取り組んでおり、本研究においても協力した。これらの状況をまとめたのが下図であり、プロジェクトリーダーの的確なマネジメントによって大きな計画変更なく進められた。



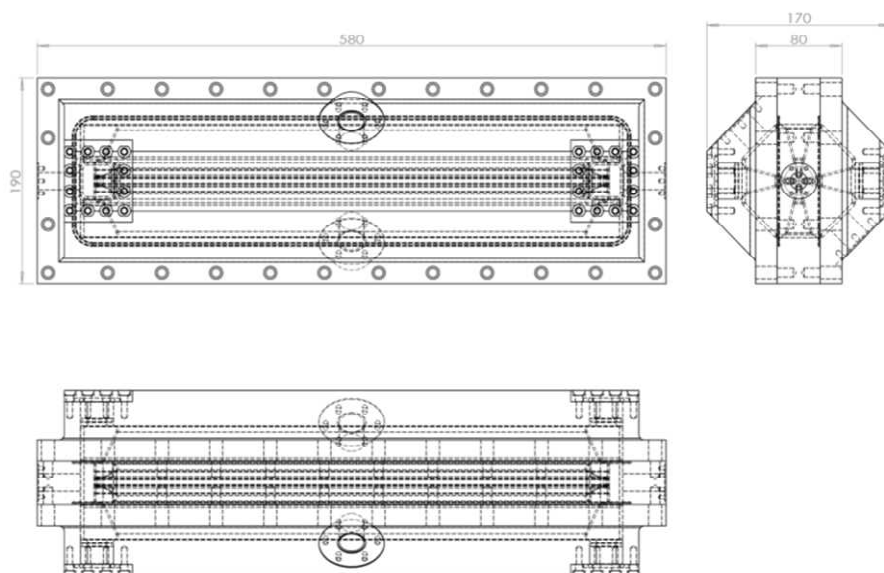
本研究の実施体制図



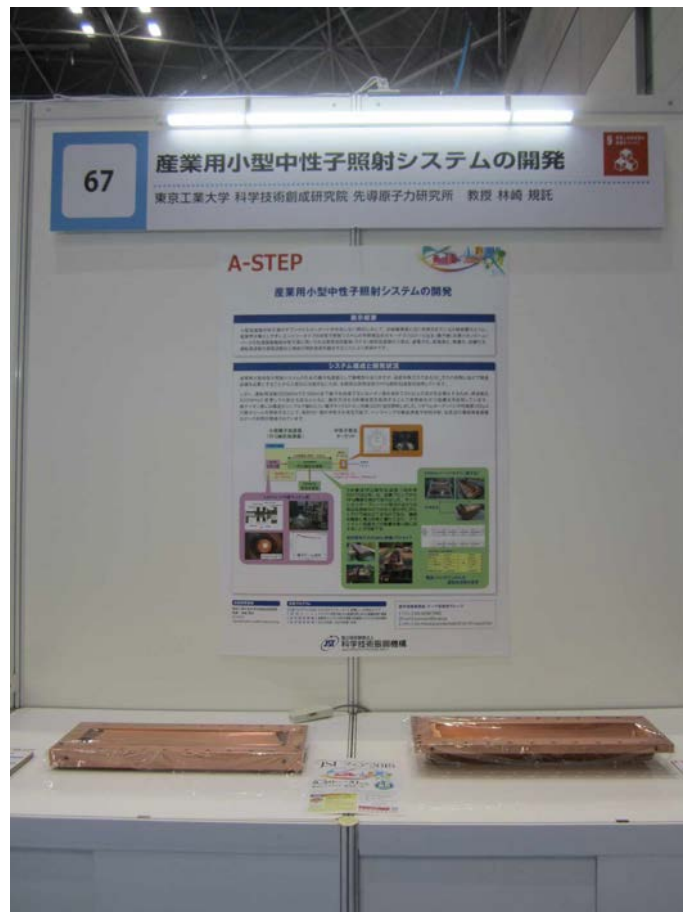
650MHz-RFQ 線形加速器の 3 次元 CAD モデル



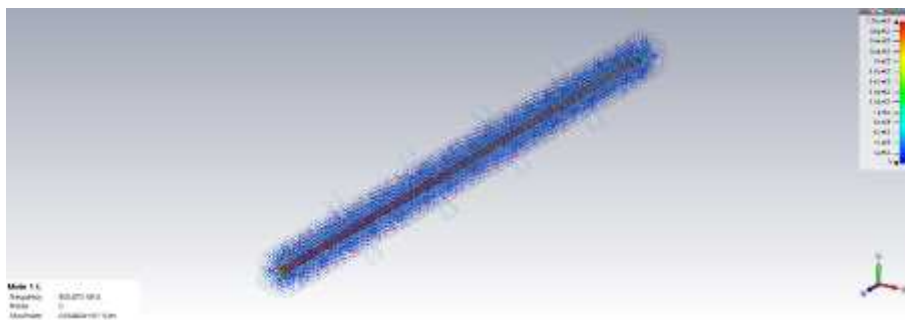
650MHz-RFQ 線形加速器の高周波シミュレーションの例(電場分布)



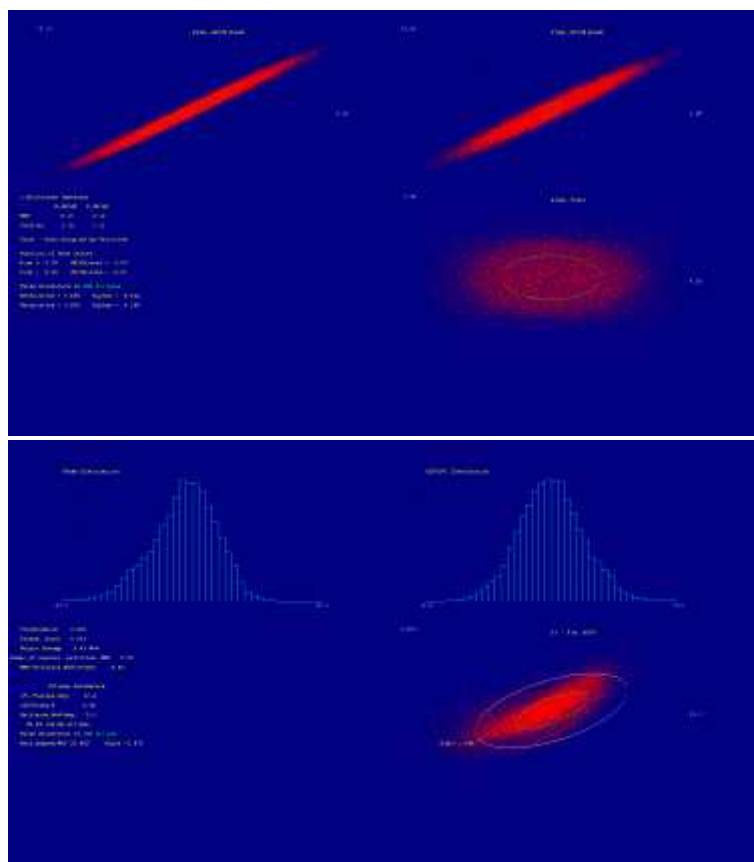
650MHz-RFQ 線形加速器のコールドモデル(形状図)



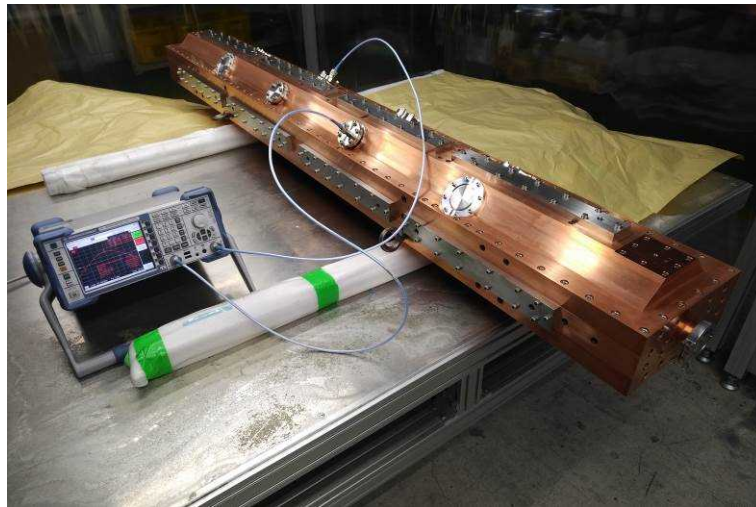
650MHz-RFQ 線形加速器のゴールドモデル(JST フェア展示の様子)



500MHz-RFQ 線形加速器の高周波シミュレーションの例(電場分布)



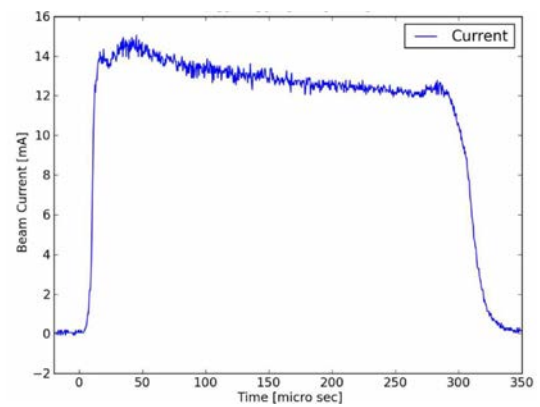
500MHz-RFQ 線形加速器のビームシミュレーションの例



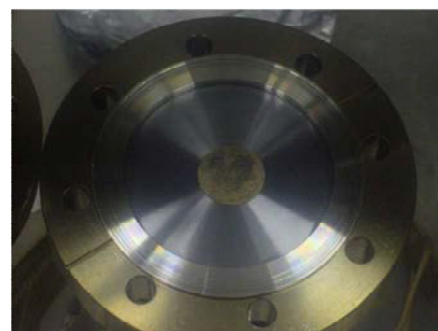
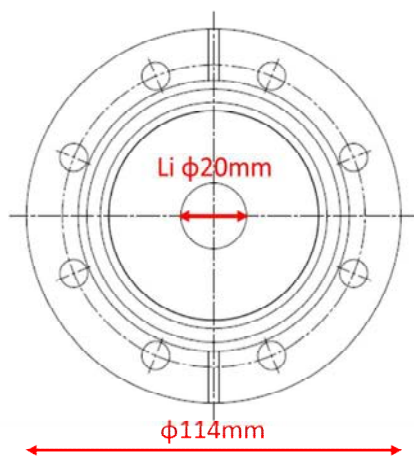
500MHz-RFQ 線形加速器の実機プロトタイプ



2.45GHz-ECR イオン源



陽子ビームの時間波形の例



改良型リチウムターゲット

7. 産学の対話の活用状況

「産学共創の場」や「サイトビジット」における、PO やアドバイザー、産業界関係者より頂戴した助言やコメントを活用することで、商品化に向けた装置仕様について、より具体的に検討することができた。また、企業との共同研究を創出することができた。

8. 創出された研究成果(企業との共同研究、特許、論文など)のリスト

①企業との共同研究等(共同研究、サンプル・ノウハウの提供など) 非公開

②-1論文・著書(査読付き)

(国内)(海外) 該当なし

②-2論文・著書(査読無し)

- [1] 林崎規託, 池田翔太, 村田亜希, 650MHz RFQ 線形加速器を用いた産業用小型中性子源の開発, 日本原子力学会「2017 年秋の大会」予稿集, 2N10, H29.9

③学会発表(招待講演含む)

(国内)

- [1] 林崎規託, 池田翔太, 村田亜希, 産業用コンパクト中性子源のための小型陽子加速器システムの設計, 第 13 回日本加速器学会年会, 幕張メッセ国際展示場, H28.8.9, 一般・ポスター
- [2] 林崎規託, 池田翔太, 村田亜希, 産業用コンパクト中性子源のための小型陽子加速器システムの開発, 第 14 回日本加速器学会年会, 北海道大学, H29.8.2, 一般・ポスター
- [3] 林崎規託, 池田翔太, 村田亜希, 650MHz RFQ 線形加速器を用いた産業用小型中性子源の開発, 日本原子力学会「2017 年秋の大会」, 北海道大学, H29.9.14, 一般・口頭
- [4] 林崎規託, 池田翔太, 村田亜希, 産業用コンパクト加速器中性子源の開発, 日本原子力学会「2018 年春の年会」, 大阪大学, H30.3.26, 一般・口頭

(海外)

- [1] Noriyosu Hayashizaki, Shota Ikeda, Aki Murata, Design of a 650 MHz proton RFQ linac, 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, University of Jyväskylä, H28.7.5, 一般・ポスター

④知的財産(特許権、実用新案権など)

(i)特許出願 (国内)(海外) 該当なし

(ii)特許登録 (国内)(海外) 該当なし

⑤他制度への展開 非公開

⑥その他(受賞、新聞報道、招待講演、展示会等の出展など)

- [1] 林崎規託, 服部俊幸, 石橋拓弥, 山内英明, 平成 27 年度手島精一記念研究賞(発明賞), 「四重極型加速器および四重極型加速器の製造方法」, H28.2.23

- [2] 日経 xTECH「構造物の検査から次世代がん治療まで、デスクトップ加速器が開く未来」
<https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/column/15/092100068/121800040/?P=1>
- [3] 林崎規託, 産業用小型中性子照射システムの開発, JST フェア 2018, H30.8.30-31

Ⅲ. 今後の展開

9. 成果の今後の展開

1 社に 1 台をキーワードに、産業界における現在の中性子ユーザーや、中性子に興味をもっているユーザー候補者の方々との情報交換や意見交換を通じて、企業にとって導入しやすく使いやすい総合的な装置の開発を、本プログラムのシナジー効果も活かしながら、陽子ビーム加速実験や中性子発生実験による実証も含めて展開していきたい。