

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「医療用加速器中性子源技術の産業利用への応用に  
関する研究」

令和2年5月31日  
プロジェクトリーダー  
機関名： 国立大学法人筑波大学  
氏 名： 熊田博明

## I. 研究計画の概要

近年、中性子線と薬剤を組み合わせた癌治療法である BNCT 分野では、この治療に要求される大強度の中性子を商用型小型加速器を使って発生できる技術が急速に発展してきた。この医療分野で特異的に進展している加速器中性子源技術の産業分野への応用性について探究する。筑波大学の BNCT 用リニアック中性子源を機能拡張し、同装置で熱中性子も発生する環境を開発整備し、この環境を産業分野、基礎研究分野の開発に提供し、これらの研究分野を支援する。

### 1. 研究の目標

プロジェクトリーダーが所属する筑波大学は、これまでに直線型加速器(リニアック)ベースの医療用(BNCT)加速器中性子源を開発し、「いばらき中性子医療研究センター」に設置している。本提案の全体目標は、この医療用に開発整備した加速器中性子源技術を応用し、以下に示す研究開発を実施して産業用・量産普及型・小型中性子源装置を安価に製造できる技術基盤を確立し、本事業の終了時点で同装置を発注整備できる状況を整えることを目指す。

- ① 筑波大学の BNCT 用加速器中性子源の中性子発生装置部のモデレータを改良、機能拡張し、産業利用可能な低エネルギー中性子(エネルギー・ピーク:30~40meV 辺りの熱中性子)をビーム照射孔位置で  $3 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) 以上の中性子束を発生できる産業用ビームポートを開発整備する。
- ② ①で開発した熱中性子ビームポートを、本 A-STEP 事業に参加する中性子回折、小角散乱、マルチ即発  $\gamma$  線計測等の研究グループに提供し、これら中性子利用研究分野の計測機器開発等に寄与する。(図1参照)また、この中性子提供を通じて各研究グループからの情報を、次の③に示す産業専用熱~冷中性子源装置の中性子発生装置の最適設計に反映させる。

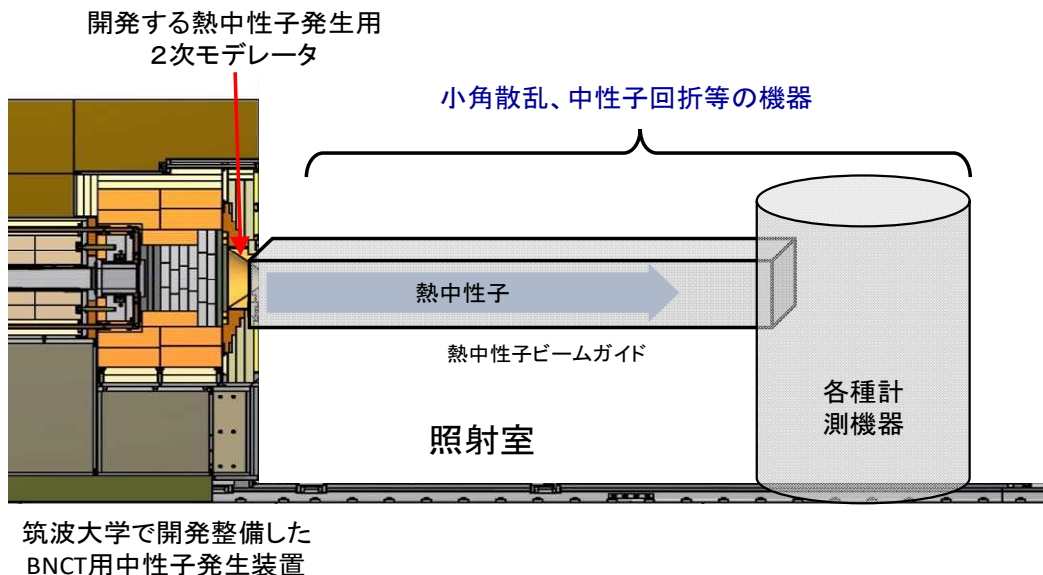


図1 本研究で開発整備する熱中性子発生装置と中性子を利用した研究グループへの提供

- ③ ①、②の研究活動を通じて産業用中性子源に求められる要件、機能、性能を把握し、最終的にコンパクトな加速器ベースの産業専用熱～冷中性子源装置を安価に製造できる技術基盤を確立する。具体的な目標として、現時点で産業用加速器中性子源の代表である理化学研究所・和光の“RANS”と同等サイズ、同規模で、開発コストも15億円程度に抑えながら、RANSの100倍以上の熱～冷中性子の強度、具体的な数値目標として陽子ビームパワーで80kW～100kW、エネルギー・ピーク:5meV～15meV、ベリリウム標的位置の中性子束で $5 \times 10^{11}$  (n/cm<sup>2</sup>・s)以上、モデレータ後のビーム孔位置で $1 \times 10^9$  (n/cm<sup>2</sup>・s)以上の熱～冷中性子束を発生できる産業専用加速器ベース熱～冷中性子源装置の概念設計を行い、同装置をメーカーに製造発注できる環境を構築することを目指す。

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

- (1) モンテカルロ解析で2次モデレータを設置することで40meV 辺りにピークを有する熱中性子を発生できることを確認する。陽子ビームの電流値:2mA で  $1.3 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) 程度の強度の中性子を発生できることを確認する。(平成28年10月)

#### ○達成状況

中性子、粒子、光子の輸送計算が可能なモンテカルロ・コード:PHITS を用いて、iBNCT 装置と施設を再現し、iBNCT 装置の中性子発生シミュレーションを実施できる状況を作成した。この装置に対して、様々な材質と形状の2次モデレータをビーム孔位置に設置し、中性子を発生するシミュレーションを実施した。この結果から2次モデレータの材質にはポリエチレンを採用することとした。また、陽子ビームをベリリウム標的に照射して中性子を発生させた場合、2次モデレータを通過した位置で40meV あたりにピークを有する熱中性子を発生できることを確認した。また、陽子ビームの平均電流値:1mA 時での熱中性子(～0.5eV)の中性子束は約  $7.0 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s)、中性子エネルギー:40meV でのピークフラックスは、 $1.2 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) であった。この結果から、陽子ビーム電流を平均 2mA に設定した場合の熱中性子束は、 $1.4 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) となり、計画通りの熱中性子を発生できることを確認した。(平成 28 年 3 月)

- (2) モンテカルロ解析による2次モデレータの製作設計に基づいて、熱中性子を発生し、産業用中性子利用研究グループにビーム提供できる環境を整備する。実測で目的の中性子束を発生できることを確認する。(平成29年4月)

#### ○達成状況

モンテカルロ解析に基づいて設計したポリエチレン製2次モデレータを製作した。このモデレータを実際のiBNCT装置のビーム孔位置に設置して照射実験を行い、発生する中性子の特性を実測した。この結果から、2次モデレータを通過した後のモデレータ表面で、カドミ比で約6程度の熱中性子を発生できていることを確認した。また、熱中性子束は、平均電流:1.0mA で中性子を発生した場合、最大で約  $6.7 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) であった。すなわち平均電流:2.0mA で稼働させて中性子を発生させた場合、最大中性子束:  $1.34 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) の熱中性子を得られることを確認し、ほぼモンテカルロシミュレーション通りの中性子を発生できていることを確認した。さらに、熱中性子の分布では、2次コリメータの表面の中心部から半径約7cmの範囲にわたって、 $6.0 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) 以上の熱中性子を発生できていることを確認した。

当該施設は、医療(BNCT)用施設であるが、当中性子ビームを利用したい学内外のグループに対しては、筑波大学と関連する研究の一環として共同研究を締結することで当中性子を

関連する研究開発に用いることができる環境を整えた。(平成 28 年 12 月)

- (3) 変更前: 照射室と実験機器格納スペースを整備し、産業用熱中性子を用いた各実験機器開発グループへの供用環境を整備。中性子回折グループや小角散乱グループ、即発 $\gamma$ 線計測グループにビームを提供し、これらグループによる実験を実施できることを確認する。特に中性子回折グループでは短パルスの中性子ビームを用いた計測を行って短パルスビームの実用性を確認する。

変更後: 照射室と実験機器格納スペースを整備し、産業用熱中性子を用いた各実験機器開発グループへの供用環境を整備し、医療分野以外の研究用途に提供する。具体的にはボナー球を用いた中性子スペクトル測定実験を実施する。また、新しい中性子計測機器(中性子シンチレータ、比例計数管、フラットパネル検出器、即発 $\gamma$ 線計測装置等)を照射室内に設置し、当該装置が発生する中性子を照射して各種実験を実施する。また、放射線生物学の基礎研究として、細胞や小動物に対する照射実験も可能であれば実施する。(平成30年7月)

変更理由: (平成 28 年度全体実施計画を変更)

○達成状況:

当初計画では後述する短パルス中性子を発生する計画で、これを用いて小角散乱実験、中性子回折実験への適用性を検討していたが、中性子強度と安定性を優先して短パルスビームの発生は当該装置では行わないこととしたため(後述)、これらの実験グループへの適用は実現できなかった。しかし当初想定していなかった他の研究開発グループ:主に中性子計測機器開発、中性子遮蔽材開発などのグループから当該装置の利用要請があり、これらを受け入れた。平成 29 年度には産総研のグループがボナー球を用いた中性子スペクトル計測を実施し、さらに同グループは新しい中性子検出器を組み合わせたスペクトル計測技術の開発目的のため、同施設での実験を実施した。また、被ばく線量計の製造販売を行っている企業とも共同研究を締結し、当照射室内に新規線量計を設置して中性子計測実験を実施した。さらに新規ホウ素薬剤の研究を行っている沖縄科学技術大学院大学のグループは、当施設の生物実験室も合わせて利用し、細胞とマウスに対する中性子照射実験を実施した。

中性子のフラットパネル検出器を開発している東京大学の高橋教授とも協議を進め、可能であれば当事業期間内(2020年3月)までに同検出器の照射実験を実施する方向で調整している。また、茨城大学の小泉教授との打合せを行っており、本事業が終了した後も当中性子照射場の共同利用について検討を進めている。この検討結果は、後述の(7)の「産業専用加速器の仕様書を策定」にも反映させる。これらの結果から、平成 30 年度までに筑波大学外の5つの研究機関、大学、企業が当該施設の中性子ビームを利用した実験を実施した。また、平成 31 年度も9つのグループが当該施設での照射実験を実施することを計画している。(平成 31 年 3 月)

(4) 変更前: イオン源で発生する陽子ビームをビームチョッパーシステムを使って 10  $\mu$  sec のビームを切り出せることを加速器側の陽子ビームモニターで確認する。また陽子ビームのパルス幅に応じたパルス幅の中性子ビームを発生できていることを熱中性子に感度のある LiCaF シンチレータ等のリアルタイムモニターで計測して確認。

変更後: イオン源で発生する陽子ビームを 10  $\mu$  sec 程度の短パルスのビームを切り出す方法を検討する。一般的に用いられるビームチョッパーシステムによる短パルス切り出し法に代わり、陽子ビームを分岐する方法の検討を行う。また、より大電流化を可能にするための新しいイオン源方式に関する検討も実施する。(平成30年7月)

変更理由: 当初計画ではイオン源と RFQ の間のビーム輸送系 (Low Energy Beam Transport: LEBT) にビームチョッパーを設置し、短パルスを生成することを検討していたが、大電流化を優先したことで、LEBT にチョッパーを設置する空間的余裕がなくなった。そこで、代替案を計画することとした。また大強度化のため、イオン源の高度化も合わせて検討することとした。(平成 28 年度全体実施計画を変更)

○達成状況: ビームチョッパーの代替案として、RFQ の透過率がイオン源の引き出し電圧によって変化することを利用し、イオン源の引き出し電圧を高速でスイッチングすることによる短パルスの生成を検討した。40kV に 10kV のパルスを重畳させるバウンサー回路を設計し、スイッチング試験を行った結果、立ち上がり、立ち下りともに 1~2  $\mu$  s での電圧波形の生成ができ、フラットトップで 10  $\mu$  s のビームが実現できる可能性を実証した。実際のイオン源や RFQ と組み合わせたビーム生成や中性子生成の実証試験は、電源の改造が必要なことなどから、当 iBNCT 実機での試験はできなかったが、短パルス化の目的を実現できる見通しを得た。

イオン源に関しては、開発当初に用いていた軸磁場型 ECR イオン源は、外部での放電の抑制に費用と期間を要することが判明し、マルチカusp磁場型イオン源に主軸を移した。プラズマ閉じ込め磁場分布の最適化により、プラズマが点弧しやすく電流も出る良い条件を探す高度化を行った結果、iBNCT の試験に適合する平均電流 2mA のイオン源を実用化した。更に高い電流が期待されるアーク放電型のイオン源の開発を、KEK つくばキャンパスのテストスタンドで行い、ピーク電流で 53mA の引き出しに成功した。テストスタンドの電源は、高デューティの試験を行うには容量が不足しており実証には至らないが、デューティ 20%の電源ができれば、ピーク電流 50mA で、平均電流 10mA が期待され、当初の目標を実現できるイオン源となりえる見通しを得た。(平成 30 年 7 月)

(5) 変更前: MEBT の開発整備と、ビームロスを最小化するビーム診断輸送システムの製作設置により、陽子ビームの大電流化を図り、加速器のビームモニターで目標の陽子ビーム電流値: 6mA を発生することを確認。

変更後: MEBT の開発整備と、ビームロスを最小化するビーム診断輸送システムの製作設

置により、陽子ビームの大電流化を図り、陽子ビームの平均電流:1mA 以上で定常的、安定的に稼働して中性子を発生できる技術を確立する。また、平均電流2mA 以上で稼働させて中性子を発生できることを確認する。（平成31年4月）

変更理由： 当 iBNCT 装置の加速管は平均電流:5mA 以上で稼働するように設計、製作していた。これに基づいて A-STEP 事業の事業計画も策定していた。しかし事業を進める過程で、電源系、冷却系統、真空系統などがボトルネックとなり、平均電流 5mA で稼働させることは困難であることが明らかとなった。そこでより確実、かつ、安定的に中性子を発生させることを優先し、陽子ビームの目標値を下方修正した。（平成 28 年度全体実施計画を変更）

○達成状況：

RFQ と DTL の間をつなぐ中間エネルギービーム輸送系 (Medium Energy Beam Transport (以下、MEBT)) はビームダクトとビームを収束させる複数の 4 極磁石から構成される。4 極磁石の役割は、RFQ から出射されたビームの拡散を防ぎ、更に水平と垂直方向のビーム特性を DTL のアクセプタンスに合わせることである。初期の MEBT には 2 個の永久 4 極磁石 (Permanent Quadrupole Magnet (以下、PQM)) が設置されていた。我々は DTL 内でのビーム損失を減少させるためビームシミュレーションを実施した。その結果、MEBT の PQM を 3 個にした方が良いことが判明した。そこでシミュレーションが要求した磁場強度を持つ 3 個目の PQM を実際に設計・製作・設置した。PQM の構造は磁化軸の異なる 8 個の台形磁石を組み合わせて 4 極を構成する Halbach 型である。設置後、DTL のビーム透過率は上昇 (DTL 内のビーム損失は半減) した。ビーム強度が大きいので、ビーム損失は残留線量に影響するため、MEBT の改造の効果は大きかった。これらの改良、高度化により平均電流:1.4mA での安定運転 (稼働率:90%以上) を実現。また、平成 31 年 2 月には平均電流:2.8mA での運転に成功。(平成 31 年 2 月)

(6) 変更前： 加速器の大電流化により目標の大強度の熱中性子: $4 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) を発生できる加速器中性子源を完成。このビーム環境をビーム利用グループに提供し、同ビームを使って効率的に実験を実施できることを確認。

変更後： 加速器の大電流化により熱中性子束で  $2 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) 以上を発生できる加速器中性子源を完成。このビーム環境をビーム利用グループに提供し、同ビームを使って効率的に実験を実施できることを確認。（平成31年4月）

変更理由： 上記目標と同様に、電源系、冷却系統、真空系統などがボトルネックとなり、平均電流 5mA で稼働させることは困難であることが明らかとなった。そこでより確実、かつ、安定的に中性子を発生させることを優先し、陽子ビームの目標値を下方修正した。これに伴って発生する中性子強度も低下することとなった。（平成 28 年度全体実施計画を変更）



○達成状況:

安定に大電流ビームを加速するために施した事項は以下の通り:

(a) クライストロン出力制御をフィードフォワード(FF)のみからフィードバック(FB)併用に変更;

初期はクライストロンの動作を飽和領域で行い、出力調整はカソード電圧(いわゆる高電圧)を変えて行う構想だった。しかし、加速空洞内の RF パワーレベルを一定かつ安定にし、更にビーム負荷の補償を確実に行うには、クライストロンを比例域でフィードバック(FB)とフィードフォワード(FF)の併用で制御した方が確実なので、FB/FF を行うための制御系を導入した。しかし、2つの異なる空洞(DTL と RFQ)を1台のクライストロンで駆動する場合に、制御信号としてどちらの空洞を優先すべきか自明ではなかったので実験を行い、どちらの空洞からの信号でも十分制御できることを確認した。

(b) 空洞冷却水の流量増加と、冷却水温制御をクライストロン制御系と一体化;

安定運転には空洞の温度上昇は少ない方が良いので、冷却水の循環ポンプを交換し、能力を上げて、水量を増やした。更に RFQ の冷却水配管をできるだけ並列にして流れを良くした。一方、空洞運転中に空洞内の放電等で、RF 供給が停止した場合、可能な限り短時間で RF を復帰させる必要がある。しかし RF が切れると、空洞が冷えて共振周波数がずれ、パワー再投入ができなくなる。この際に DTL の可動チューナー、冷却水温度、RF の周波数の3者を自動的に調整し、復帰までの時間を短縮する仕組みを構築した。更に冷却水温の制御も精密にし、空洞の安定度を改善した。

(c) RFQ の真空排気能力改善;

RFQ の放電を抑制するには空洞内の真空度を改善する必要があった。排気能力の大きなポンプは既に設置してあったが、排気ポートのコンダクタンスが不十分であった。幸い、RFQ の固定チューナー(36 個)が排気ポートとして利用できるため、予算上可能な範囲で多くのチューナーにマニユホールドを接続し、全体の排気コンダクタンスをあげた。その結果、前述の冷却水増強と合わせて、RFQ の安定度は劇的に向上した。

(d) 8MeV 陽子ビーム輸送系にビーム診断系を追加

新規に予定している中性子利用ビームラインにも利用可能なビーム診断用モニターを開発し、現在の BNCT ビームラインに設置した。一つは、標的の下流に設置した中性子モニターである。このモニターは特殊なシンチレーションカウンターであり、標的の下流の定位置に固定してあり、その出力を常時計測している。このカウンターの計数変化を測定することで、標的の健全性がモニターできる。もう一つはビームダクトの特定位置の上下左右に装着した熱電対による位置モニターである。陽子ビームモニターとして、上下左右の 4 電極を持ったバンチ位置モニター(BPM)がビームライン上に最初から用意してある。この BPM は通過ビームがバンチ常であることを前提にしている。しかし BNCT では、ビームバンチは DTL を出た後、縦方向の収束系はないのでバンチ形状が徐々に崩れるため、標的に近くなる程、BPM 測定による位置精度は悪化する。そこで位置データを補助として、前述の熱電対を利用している。

(7)一連の研究開発を通じてピーク点で  $1 \times 10^9$  (n/cm<sup>2</sup>・s) 程度の熱～冷中性子を発生できる産業専用加速器の仕様書を策定する。この仕様書に対して加速器メーカーより見積書案を取得し、目標の価格で同装置を発注整備できることを確認する。(令和2年3月)

○達成状況:

前述したこれまでの活動で習得したモンテカルロ輸送計算コード:PHITS による解析手法と、iBNCT 施設の実際開発に関する経験、実績を踏まえて、40meV 付近にピークを有する熱中性子で、フリービーム条件下で最大熱中性子束:  $1 \times 10^9$  (n/cm<sup>2</sup>・s) 程度の中性子ビームを発生できる加速器ベース中性子源の装置仕様を策定した。以下にその概略を示す。

項目	要求仕様
加速器	直線型加速器、静電型加速器
陽子エネルギー	8~12MeV 程度 (Be の放射化閾値以下)
標的材料	ベリリウム
平均電流	10mA 以上
高エネルギー中性子用デレータ材料	鉄、フッ化マグネシウム
熱中性子発生用モデレータ材料	ポリエチレン

ここで、当初計画ではフリービーム条件下で  $1 \times 10^9$  (n/cm<sup>2</sup>・s) の熱中性子を発生させることを想定した。しかし実際の産業利用、研究利用ではこの大強度の熱中性子を発生させなくても利用することが可能である。例えば熱中性子束を 1/5 の  $2 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) にすることで、加速器側の要求電流値は、2mA まで落とすことができ、この電流値であれば、既に iBNCT の加速器、そして、ベリリウム標的で技術実証できている実現可能なレベルとなる。また、iBNCT は医療用(BNCT)用として開発され、高度な安定性と品質管理、そして、薬事承認対応という産業分野では不要となる事項も考慮して開発されており、高コストとなっている。これらの要件を緩めることで装置の製造コストは大幅に低減できると考える。

これらを踏まえて、要求仕様を以下で更に具体的に検討してみる。

陽子ビームのエネルギーは最低の 8MeV で十分な強度の中性子を発生できることが我々のシステムで実証された。そして陽子エネルギーを 8MeV とするならば、加速器の寸法から静電加速器と高周波線形加速器も寸法的には大差ない。更に後述するように空洞の共振周波数を上げれば、システム全体が小型化でき、静電加速器に比べて有利になる。線形加速器の場合は我々の場合のように RFQ+DTL という構成になり、通常は2組の大電力高周波源が必要になる。しかし、今回1台の高周波源(クライストロン)から2台の異なる加速空洞に大電力を供給して安定にビームを加速できることが証明されたので、中性子発生用には1台RF源形式が採用できることが判明した。(もしエネルギーを高くすると、DTL が受け持つ加速器エネルギーが増えるため、単一クライストロンでのRFQとの同時駆動は難しくなる。)

次に決めるべきなのは空洞の周波数である。我々の加速器は J-PARC の線形加速器を基

本として設計・製作されており、その共振周波数は 324MHz である。J-PARC が 324MHz を選んだ理由は、ドリフトチューブ(DT)の中に収めるビーム収束用の 4 極磁石を磁場強度調整できる電磁石にしたためである。加速勾配を上げるには共振周波数は高めにしたいし、その方が空洞も小型にできる。そしてクライストロンも周波数が高くないと利用できない。しかし、空洞が小さいと電磁石が収まらない。クライストロンが利用できる最低限の周波数はおよそ 300MHz 以上であり、電磁石を新製法で最小化して、324MHz を実現している。一方、我々の BNCT で DTL に内蔵されている 4 極磁石は永久磁性で小型である。加速器が短く、出射後はすぐに標的なので磁場調整を精密にやる必要がないからである。従って本来 DTL はもっと共振周波数を上げて小型にできる。400~500MHz の範囲で製作可能である。(RFQ は元々高い周波数でも製作可能である。)周波数を上げると、空洞寸法も高周波源も反比例して小型になる。更に DTL の製作が簡単になる。すなわち現在の寸法では空洞の強度は空洞構造材の鉄製円筒で維持している。しかし鉄の電気伝導度が低いため、内面に銅メッキを施している。しかし、周波数を上げ小型にすると、全てを銅で製作できるためメッキ工程が省け費用面でも大きく抑制できる。小型化という観点から考えると将来的には RF 源をクライストロンから半導体を用いた個体増幅器に変更できるかもしれない。現状では UHF 帯で数 100kW の個体増幅器は価格面で厳しいが、近い将来には十分期待できる。

小型加速器中性子源装置のキーとなるのは、中性子発生標的である。本提案の中性子源では、入射する陽子のエネルギーが 8~12MeV と比較的低いため、ベリリウム中の陽子の Bragg Peak 深さは 0.6 mm から 2 mm 以下である(陽子エネルギーに依存する)。プリスタリングを抑制するためベリリウム中で陽子を止めないようにするために、ベリリウム厚さは、この Bragg Peak 深さよりも薄く設定する必要があるが、この厚さのベリリウムではベリリウム単体では陽子ビーム輸送系の真空窓を構成することができない。したがってベリリウムの背面(下流側)には強度を補強するためのバックング材を配置する必要がある。また、大電流陽子の入射による発熱に対する冷却と、陽子蓄積によって生じるプリスタリング破損を抑制するための構造的工夫が必要である。そこで iBNCT 装置と同様の三層構造の標的システムを提案する。下に三層構造ベリリウム標的の概略図を示す。ベリリウムの厚さは入射する陽子エネルギー(8~12MeV)に合わせて調整する。二層目は入射した陽子の蓄積能のある材質を配置する。iBNCT ではパラジウムを使用し、実績があることからパラジウムが有力と考える。三層目は、冷却用のヒートシンク層として銅で製造する。

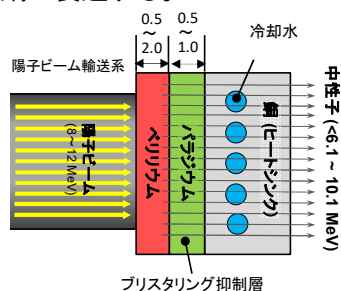


図 8~12MeV 陽子ビーム用三層構造ベリリウム標的の概略

モデレータ構造も iBNCT の技術を応用する。ただし研究用・産業用中性子源では、熱～冷中性子を利用することが主となるため、これら低エネルギー中性子を発生できる構成とする。モデレータの概略図を下に示す。

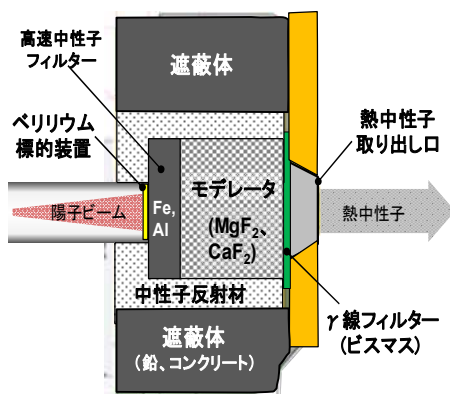


図 リニアック×ベリリウム標的ベースの熱中性子発生用モデレータの概略

以上の提案事項を踏まえて、研究用・産業用のリニアックベース中性子源施設の概略について検討した。提案する同中性子源施設の概略図を下に示す。この図ではリニアックと中性子発生部を並行に配置し、リニアックから発生した陽子ビームを 2 回曲げてベリリウムに照射する方式としているが、リニアックを図の縦方向に配置して、ベリリウムに 1 回曲げることで照射できる配置にすることで、陽子ビーム輸送系をさらに短く、コンパクトにすることができ、陽子ビームの透過率も向上できることが期待される。

熱中性子発生用と冷中性子発生用のモデレータの配置、中性子を取り出した後のビームガイド等の構成は、ユーザーの利用目的(中性子散乱、イメージング等)と利用数に合わせて施設設計時に最適化できる。

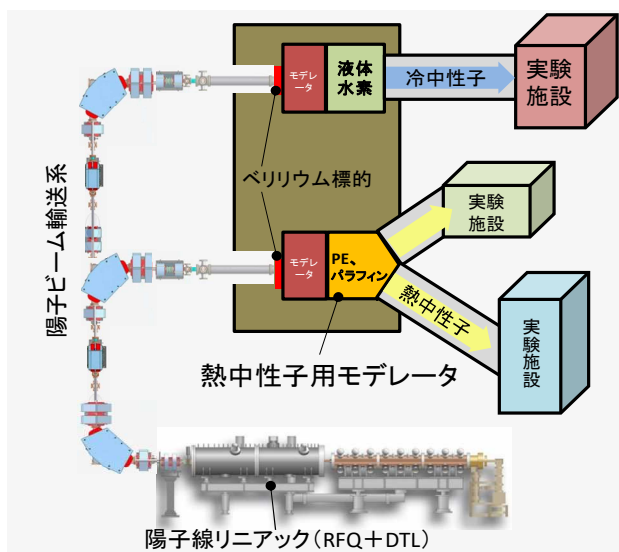


図 研究用・産業用リニアック×ベリリウム標的ベース中性子源施設の概略

## 5. 研究計画全体の進捗状況

本研究では、小型陽子線加速器を用いて大強度の低エネルギー中性子を発生させるための技術的課題として、①陽子リニアックの大電流化、②短パルス中性子ビームの発生、③中エネルギー(8MeV程度)の陽子とベリリウム標的との組み合わせで発生する中性子源から低エネルギーを発生、といった課題があった。その中でも大きな課題となったのは加速器の大電流化であるが、開発体制として J-PARC 開発で多くの実績を有する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)と連携した研究開発体制を構築してプロジェクトを進めることができたのが、最も大きな成果と考える。直線型加速器で平均電流で数 mA~数十 mA クラスの陽子を扱える技術は、世界的にも未だほとんど確立できていないため、一般の企業、メーカーなどがいきなり装置製造を行える段階ではないため、この分野の専門家集団と連携することで事業期間内にある程度の成果を上げることができた。この事業で確立した技術は、速やかに加速器メーカーに技術移転することを進めていきたいと考えている。

具体的な技術課題への解決については、事業開始当時は平均電流で数百  $\mu$ A 程度しか扱えていなかった加速器を、イオン源、冷却系、真空系、制御系技術をそれぞれ高度化することにより、10 倍以上の 2.8mA での陽子加速に成功させた。また、この開発を通じて、現 iBNCT 装置では加速管は、設計では 5mA 以上の陽子を扱えるように設計、製作されているが、各機器の冷却系などの課題があり、5mA までは達成させることは容易ではないことが明らかとなった。この経験を基に、2 号機以降の製作では、目標の発生電流値(=発生中性子強度)に対して、どの系統にどのような仕様の装置、機器を組み合わせるべきか、という知見を得ることができた。

中性子の産業利用、研究利用では、医療(BNCT)利用とは異なり、短パルスビームを発生させる必要があるが、現状の医療用中性子源ではこれを実現することは困難であった。しかし当プロジェクトを通じて、ビームチョッパーに代わる方法で短パルスビームを発生させる見通しを得ることができた。当 iBNCT 装置では実証することはできなかったが、この得られた知見を基に、産業用中性子源を製造する場合には、得られた手法を組み合わせることで実現可能となる。

低エネルギー中性子発生技術に関しては、モンテカルロ・コード PHITS を用いた解析技術を習得できたため、PHITS を用いたシミュレーションにより適切なモデレータ設計が可能となる。ただし核データの問題から、ベリリウムと陽子との反応からのシミュレーションは、評価誤差が大きくなることが明らかとなっているため、ベリリウムから発生する中性子の線源を適切に設定することが必要であることも分かった。iBNCT 装置の 8MeV 陽子と 0.5 mm 厚ベリリウムとの反応で発生する中性子線源については、本事業を通じて高精度な線源を策定することができた。

熱中性子用の減速材としてはポリエチレンを用いることで比較的安価に熱中性子を発生できることを実証した。さらに低エネルギー：冷中性子などを発生させたい場合は、本 A-STEP 事業の理化学研究所の山形氏のグループが研究された成果を参考に組み合わせることができると考える。これは様々な研究テーマと一緒に実施している本 A-STEP 事業の特徴であり、良い成果であると考えている。

## 6. 研究実施状況

当事業の主課題は、前述したように医療用(BNCT 用)加速器中性子源装置の高度化、安定化とこの中性子源の医療分野以外への適用性の検討であった。当グループの加速器はJ-PARCのリニアックをベースに設計、製作したRFQ+DTL型のリニアックであった。したがって加速器の高度化においては、J-PARCに関するノウハウ、知見が不可欠であった。よって当事業の課題を効率的、かつ、確実に遂行するため、研究体制として加速器装置を所管する筑波大学に加えてJ-PARCの開発、運用に携わっている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)の3機関の体制を構築して事業を実施した。取得した予算の多くは加速器の開発高度化に充てて事業を遂行した。ここで予算の配分方法としては、本来は加速器の開発、高度化を実施しているKEKとJAEAに直接配分した方が効率的であったが、加速器本体の所管が筑波大学であったため、装置に直接関わる機器整備、改造に関しては筑波大学に予算を配分して開発を実施した。KEKとJAEAに対しては、要素技術(次期イオン源の要素技術等)などの基礎的研究、解析、コーディングといった役務作業に関連する開発に対して予算を配分して効率的に活動を実施した。

実際の加速器開発では、筑波大学とKEKとは本事業とは別の共同研究契約も締結して、より連携して活動を遂行した。当加速器施設は茨城県東海村に設置しているが、KEKの研究スタッフも複数名この施設に常時常駐して研究開発活動を実施した。当該施設はJAEA、J-PARCとも隣接した場所に設置されており、両機関とも密に連絡を取りながら活動を進めることができた。

ビームチョッパーシステムの開発、およびイオン源の高度化は、プロジェクトリーダー(筑波大学)の開発方針に基づき、JAEAとKEKの共同グループで開発を実施した。JAEAはビーム力学的な評価やパルス化電源の設計、部品類や試験用消耗品の調達を主に行った。KEKはイオン源テストスタンドの構築やそれを用いた試験、電源のパルス化の試験を主に行った。また、結果の一部をiBNCT実機の試験に反映するとともに、得られた結果をテストスタンドの開発方針にフィードバックした。これらの成果をプロジェクトリーダー、KEK、およびJAEAの機関代表者と情報共有し、産業利用に向けた応用について議論した。

## 7. 産学の対話の活用状況

共創の場は非常に良い情報交換の場であったと考える。今回の A-STEP 事業では、小型中性子源の開発においても複数のアプローチが採択されており、それぞれのアイデアの情報を当該プロジェクトに活かすことができたと思う。さらには、ユーザー側である検出器開発のテーマも含まれており、開発した中性子源がどのような場で使われるのか、そのためにどのような要件が求められるのか、といった情報を得ることができた。当グループでは加速器中性子源を医療 (BNCT) 分野に適用することしか想定していなかったことから、他の分野のニーズとその要件の情報を得る機会がこれまでなかった。この共創の場などで、それらの情報を得ることができ、当該プロジェクトにおける課題解決にも役に立った。

具体的には、まず、加速器開発分野においては、東京工業大学の林崎先生の RFQ 開発は、産業用、研究用の加速器の低価格化の観点で参考になった。当グループも RFQ と DTL 型のリニアックを採用しているが、東京工業大学の加速管に比べると遥かに高コストである。将来、ベリリウム標的を組み合わせた中性子源では、我々の方式が参考になると思うが、発生する中性子強度を医療クラスまで求めなければ、それに組み合わせる加速器 (加速管) は、東京工業大クラスで良いことになる。すなわち、我々の中エネルギー陽子×リニアック×ベリリウム標的による中性子発生方法での産業用、研究用中性子源としては、東京工業大学の研究成果は我々にも活用できる情報であった。例えば、リニアックの駆動周波数も我々の RFQ とは異なり東京工業大学のリニアックは高周波数であり、これにより加速管の小型化、そして、電源等も半導体などを用いて小型化できる可能性を示した。装置の小型化は建屋の省スペース化も可能となり、トータルでイニシャルコストを下げるのが可能になる。

次に低エネルギー発生技術についても理化学研究所 (以下、理研)・山形先生らによる冷中性子発生のためのモデレータ材 (メシチレン等) の情報は大変参考になる。理研の RANS は当 iBNCT と加速器形式 (RFQ+DTL 型) と中性子発生方式 (中エネルギー陽子×ベリリウム) が類似であるため、理研のグループの研究成果を我々の中性子源方式に当てはめることができ、当加速器中性子源で冷中性子を発生させる方法の良い参考となった。さらに理研のグループは、研究の中で RANS での評価だけでなく、当 iBNCT に組み合わせた場合の特性評価 (寿命評価) なども実施してくれた。これはこの共創の場でこれまで情報交換してきた成果であると考えられる。

最後に、中性子検出器の開発グループとの交流、情報交換としては、東京大学の高橋先生の研究グループと情報交換を行うことができ、実際に東京大学で開発したフラットパネルを当 iBNCT で照射して特性測手実験を行うための検討を行うことができ、実験に求められるビーム条件、施設要件の情報を得ることができた。当事業期間内には実験を行うことはできないかもしれないが、この A-STEP 事業が終了した後も関係を継続し、速やかに実験を行いたい。

また、茨城大学の小泉先生との連携関係を構築でき、中性子の小角散乱イメージング分野への利用に求められる要件などの情報を得ることができた。茨城大学のグループとは当 iBNCT 施設とも施設が近く、今後も連携関係を継続する予定である。

## 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

### ①-1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

### ①-2企業との共同研究によって得られた研究開発成果 非公開

#### ②-1論文・著書(査読付き)

##### (国内)

1. 櫻井良憲, 熊田博明, 鬼柳善明. 中性子を用いた次世代がん放射線治療:ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)-原子炉から小型加速器へ-. 日本原子力学会誌. 2019;61(6):469-73, 査読無
2. 熊田博明, 医療用加速器中性子源の開発と産業・工業分野への応用, Isotope News, No.757, 2018年6月号, 22-25, (2018)
3. 2017年, 加速器 (Journal Particle Accelerator Society of Japan), 中性子源の利用—医学利用(ホウ素中性子捕捉療法)—, Vol.13, No.4, 253-258, 熊田博明,他

##### (海外)

1. Kumada H, Tanaka S, Naito F, Kurihara T, Sugimura T, Sakurai H, Matsumura A, Sakae T. Neutron beam performance of iBNCT as linac-based neutron source for boron neutron capture therapy. EPJ Web of Conference. 231(01003):1-4, 2020
2. H. Kumada, K. Takada, F. Naito, et al., Beam performance of the iBNCT as a compact linac-based BNCT neutron source developed by University of Tsukuba, AIP Conference Proceedings, 2160, 050013, 1-11, 2019
3. T. Onishi, H. Kumada, K. Takada, F. Naito, T. Kurihara, T. Sakae, Investigation of the neutron spectrum measurement method for dose evaluation in boron neutron capture therapy, Applied Radiation and Isotopes, 140, 5-11, 2018
4. H. Kumada and T. Takada, Treatment planning system and patient positioning for boron neutron capture therapy, Therapeutic Radiology and Oncology, Special Issue: Boron neutron capture therapy, 1-11, 2018
5. H. Kumada, et al., Development of LINAC-Base Neutron Source for Boron Neutron Capture Therapy in University of Tsukuba, Plasma and Fusion Research, 13, 2406006\_1-6, 2018
6. A. Masuda, T. Matsumoto, K. Takada, T. Onishi, K. Kotaki, H. Sugimoto, H. Kumada, et al., Neutron spectral fluence measurements using a Bonner sphere spectrometer in the development of the iBNCT accelerator-based neutron source, Applied Radiation and Isotopes, 127, 47-51, 2017
7. Z. Fang, et al., Novel auto-startup technology for two cavities of a medical accelerator with one RF source, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 922, 193-201, 2019

#### ②-2論文・著書(査読無し)

##### (国内)

1. 熊田博明、中性子線を用いた次世代のがん放射線治療:BNCT、放射線治療研究会、2019年12月号、1-10、2019年12月
2. 熊田博明、「ホウ素中性子捕捉療法:BNCTの確立に向けた研究開発」、放射線と産業、142、17-21、2017



(海外)

1. H. Kumada, S. Tanaka, F. Naito, et al., Neutron beam performance of iBNCT as linac-based neutron source for boron neutron capture therapy, Proceedings of UCANS, 1-4, 2020 (掲載予定)

③学会発表(招待講演含む)

(国内)

1. 熊田博明、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)による次世代がん治療法、加速器奨励会第8回特別講演会、2019年10月11日、東京、口頭
2. Kumada H. Activities for establishing the international standard of BNCT. 名古屋市/名古屋大学, Workshop on BNCT, 2019.9.12.
3. 熊田博明. 筑波大学の活動状況. 大阪府/京都大学複合原子力科学研究所, 京都大学複合原子力科学研究所のBNCT拠点としての効率化・高度化に関する研究会(令和元年度京都大学複合原子力科学研究所専門研究会), 2019.6.6.27. 口演
4. 熊田博明、先端的小型加速器中性子源の医学(BNCT)分野への応用、応用超伝導加速器コンソーシアムシンポジウム、2019年9月2日、東京、口頭
5. 熊田博明、次世代がん放射線治療:BNCTの確立に向けた小型加速器中性子源装置の開発、放射線計測研究会、2019年10月19日、東京、口頭
6. 熊田博明、他、筑波大学グループの加速器ベースBNCT開発の進捗状況、平成30年度京都大学複合原子力研究所専門研究会、京都大学複合原子力研究所(熊取)、2018年5月24日~25日、口頭
7. 熊田博明、他、BNCTの物理工学分野の過去、現在、未来 -BNCTを医療として確立するための工学的課題-、日本中性子捕捉療法学会第15回学術大会、北海道大学(札幌)、2018年9月1日~2日、招待口頭
8. 熊田博明、他、BNCT用治療計画プログラムの現状と今後の課題、日本中性子捕捉療法学会第15回学術大会、北海道大学(札幌)、2018年9月1日~2日、招待口頭
9. 熊田博明、他、Characteristic measurement for neutron beam of iBNCT device as a linac-based neutron source for BNCT in University of Tsukuba, 日本医学物理学会第116回学術大会、盛岡、2018年9月15~16日、口頭
10. 熊田博明、BNCTの技術、第65回放射線治療研究会、九州医療センター(博多)、2018年12月1日、招待口頭
11. 熊田博明、筑波大学の医療(BNCT)用小型加速器中性子源の開発状況、第12回Quantum Medicine研究会、茨城大学(水戸)、2019年2月17日、口頭
12. 熊田博明、他、筑波大学のBNCT用加速器中性子源の開発状況、平成30年度京都大学複合原子力科学研究所専門研究会、京都大学複合原子力研究所(熊取町)、2019年3月13日~14日、口頭
13. 熊田博明、他、筑波大学のリニアックベースBNCT装置:iBNCTの中性子ビームの特性測定、日本原子力学会2019年春の年会、茨城大学(水戸)、2019年3月20日~22日、口頭
14. 熊田博明、iBNCT(医工連携分野)、J-PARC ワークショップ「小型から大型中性子源までの施設連携研究会」、東京大学(文京区)、2019年3月28日、招待口頭
15. 熊田博明、他、筑波大学の加速器BNCT研究に関する進捗状況、平成29年度京都大学原子炉実験所専門研究会、大阪熊取、2017.5.26-27、口頭

16. 熊田博明、他、筑波大学のBNCT装置の開発状況、平成20年度京都大学原子炉実験所専門研究会「放射線治療と放射線防護のための放射線計測に関する研究会」、大阪熊取、2017.9.1-2、口頭
17. 熊田博明、他、筑波大学のBNCT装置の開発状況、平成20年度京都大学原子炉実験所専門研究会「放射線治療と放射線防護のための放射線計測に関する研究会」、大阪熊取、2017.9.1-2、口頭
18. 熊田博明、筑波大学グループの医療用加速器中性子源の開発と産業・工業分野への応用、アイソトープ協会講演会、東京、2017.9.12、招待口頭
19. 熊田博明、他、つくば産学官連携による次世代がん治療:BNCTの確立に向けた研究開発、第60回放射線化学検討会、つくば、2017.9.27-28、招待口頭
20. 熊田博明、筑波大学のリニアックベースBNCT治療装置のビーム特性測定、第14回日本中性子捕捉療法学会学術大会、郡山(福島)、2017.9.28-29、口頭
21. 熊田博明、他、小型加速器ベースBNCT用中性子源の開発と将来展望、平成29年度非破壊検査・可視化・分析技術研究会、東京、2017.11.8、招待口頭
22. 熊田博明、他、リニアック型BNCT治療装置の実用化に向けた開発、つくば医工連携フォーラム2018、つくば、2018.1.26、招待口頭
23. 熊田博明、他、小型加速器中性子源の医学応用、日本物理学会第72回年次大会(大阪)、2017年3月20日、口頭
24. 熊田博明、ホウ素中性子捕捉療法:BNCTの確立に向けた研究開発、第16回放射線プロセスシンポジウム(東京)、2016年11月9日、口頭
25. 栗原俊一、他、8MeV陽子ビームを用いたBNCT用4.5MW/m<sup>2</sup>小型ベリリウム中性子標的の開発、日本物理学会第71回年会(仙台)、2016年3月19日~22日、口頭
26. 内藤富士雄、他、iBNCT 用線形加速器のビームコミッションング、第13回日本加速器学会(千葉)、2016年8月8日~10日、ポスター
27. 栗原俊一、他、照射損傷(ブリスタリング)の遠方からの顕微観察 -レーザー反射顕微法-、第13回日本加速器学会(千葉)、2016年8月8日~10日、ポスター
28. 栗原俊一、他、レーザー反射像による照射損傷等のその場観察法、日本物理学会2016年秋季大会(金沢)、2016年9月13日~16日、口頭
29. 藤倉昇平、他、BNCT用加速器開発におけるプラズマ発光を用いたイオン源内部測定、日本物理学会第72回年会(大阪)、2017年3月17日~20日、口頭
30. 栗原俊一、他、750keV H-ビームで照射した銅、およびタングステンの照射損傷ブリスタリングの比較、日本物理学会第72回年会(大阪)、2017年3月17日~20日、口頭
31. 杉村高志、他、iBNCT 加速器の現状、第14回日本加速器学会(札幌)、2017年8月1日~3日、ポスター
32. 栗原俊一、他、高熱伝導樹脂を用いたkWクラス間接冷却コイルの開発、第14回日本加速器学会(札幌)、2017年8月1日~3日、ポスター
33. 栗原俊一、他、BNCT 用イオン源からの陽子ビームのニュートラリゼーションとその制御、日本物理学会第73回年会(野田)、2018年3月23日~25日、口頭
34. 柴田崇統、他、iBNCT用LaB6フィラメント・マルチカスプイオン源の開発状況、第15回日本加速器学会(長岡)、2018年8月7日~10日、ポスター
35. 杉村高志、他、iBNCT 加速器の現状報告、第15回日本加速器学会(長岡)、2018年8月7日~10日、ポスター

—

36. 佐藤将春、他、負ミュオンを用いたiBNCT中性子生成標的のベリリウム厚測定手法の検討、第16回日本加速器学会(京都)、2019年7月31日～8月3日、ポスター
37. 杉村高志、他、iBNCT 加速器の現状報告2019、第16回日本加速器学会(京都)、2019年7月31日～8月3日、ポスター

(海外)

1. H. Kumada, F. Naito, et al., Physical characteristic measurements for the neutron generated by the linac-based neutron source for BNCT in University of Tsukuba, 58<sup>th</sup> PT-COG, マンチェスター、2019年6月13-15日、ポスター
2. H. Kumada, S. Tanaka, F. Naito, et al., Neutron beam performance of iBNCT as linac-based neutron source for boron neutron capture therapy, UCANS-8, パリ、2019年7月8～10日、口頭
3. Kumada H. Current status of iBNCT, Seminar of Boron Neutron Capture Therapy. Republic of Korea, Gil Medical Center, Gachon University, 2019.8.26
4. H. Kumada, et al., Development status of the iBNCT device as a linac-based neutron source of the University of Tsukuba, yBNCT-10, ヘルシンキ、2019年9月27日-29日、口頭
5. H. Kumada, H. Tanaka, Y. Kiyonagi, Development status of the accelerator-based neutron source for medical application in Japan, IAEA Technical Meeting on Non-spallation Accelerator-based Production of Neutrons, ウィーン、11月4～7日、口頭
6. Kumada H. Development status of iBNCT device. NTUH(National Taiwan University Hospital)/Taiwan, 3<sup>rd</sup> NTU-UT Radiation Oncology Joint Symposium(2019), 2019.12.7. 口演
7. H. Kumada, et al., Beam Performance of the iBNCT as a Compact Linac-based BNCT Neutron Source Developed by University Tsukuba, 25<sup>th</sup> International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI 2018), Texas (USA), 2018.8.13-17, 招待口頭
8. H. Kumada, Physics/ Neutron Source, 18<sup>th</sup> International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-18), 台北 (台湾), 2018.10.28-11.02, 招待口頭
9. H. Kumada, Neutron source for neutron capture therapy, 18<sup>th</sup> International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-18), 台北 (台湾), 2018.10.28-11.02, 招待口頭
10. H. Kumada, et al., Current status of development for accelerator-based neutron source and peripheral devices for BNCT, International Symposium of Accelerator based NCT technologies, ソウル(韓国), 2018.12.10, 招待口頭
11. H. Kumada et al., Development of the linac-based high intensity neutron source for BNCT, The 3<sup>rd</sup> RAP-JCNS Joint Workshop (RIKEN Symposium), 理化学研究所(和光), 2019年2月21日～22日, 招待口頭
12. H. Kumada, et al., Development of the linac-based neutron source for boron neutron capture therapy in University of Tsukuba, CLES/LANSA' 17, Yokohama (Japan), 2017.4.18-21, 招待口頭
13. H. Kumada, et al., Development for accelerator-based BNCT devices in University of Tsukuba, Bialystok (Poland), 2017.5.22, 招待口頭

14. H. Kumada, et al., 9<sup>th</sup> Young Researchers' BNCT Meeting (YBNCT9), Kyoto (Japan), 2017.11.13-15, 口頭
15. T. Kurihara, Target challenge for High power compact accelerator-based neutron source, 7<sup>th</sup> Asian Forum for Accelerators and Detectors (AFAD) Uji Kyoto Univ. (Kyoto) 1-3 Feb., 2016, 口頭
16. F. Naito, et al., BEAM COMMISSIONING OF THE i-BNCT LINAC, 28<sup>th</sup> Linear accelerator conference, Michigan State University (USA), 25-30 Sep., 2016, ポスター
17. T. Kurihara, LONG DISTANT MICROSCOPE OBSERVATION OF RADIATION DAMAGE (BLISTERING) -POLARIZED AND LASER REFLECTION MICROSCOPE-, 6<sup>th</sup> International meeting of the Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources (UCANS-6), Xian Jiaotong University (China), 25-28, Oct., 2016, 口頭
18. M. Sato, Commissioning Status of the Linac for the iBNCT Project, 29<sup>th</sup> Linear accelerator conference, Beijing (China), 16-21 Sep., 2018, ポスター
- T. Kurihara, et al., DIFFUSION BONDED Be NEUTRON TARGET USING 8MeV PROTON BEAM, 8<sup>th</sup> International meeting of the Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources (UCANS-8), Paris (France), 8-11, July, 2019, 口頭

#### ④知的財産(特許権、実用新案権など)

##### (i)特許出願

###### (国内)

1. 発明等の名称: 線量評価システム、線量評価方法、放射線照射方法、放射線治療方法、椅子タイプ患者保持装置及び放射線照射装置、出願日: 平成 30 年 11 月 26 日、出願番号: 特願 2018-220561  
発明者: 熊田博明(筑波大学)、出願人: 筑波大学
2. 「加速器の冷却システム及び加速器の温度管理方法」、特願 2019-179643、提出日:令和 1 年 9 月 30 日、  
発明者:方志高、佐藤将春、杉村高志、福井佑治、二ツ川健太、出願人:高エネルギー加速器研究機構

###### (海外)

1. 発明等の名称: 線量評価システム、線量評価方法、放射線照射方法、放射線治療方法、椅子タイプ患者保持装置及び放射線照射装置、出願日: 令和元年 11 月 25 日、出願番号: 特願 2018-220561 発明者: 熊田博明(筑波大学)、出願人: 筑波大学

##### (ii)特許登録

###### (国内)

1. 「放射線減速材用 MgF<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub> 二元系焼結体及びその製造方法」、特許第 6377587 号、特願 2015-185053、平成 27 年 9 月 18 日、登録日:平成 30 年 8 月 3日、発明者:熊田博明、中村哲之、池田 毅、重岡卓二、出願人: 大興製作所、筑波大学
2. 「中性子線減速材用フッ化物焼結体及びその製造方法」、特願 2014-561664、平成 26 年 5 月 27 日、登録日: 平成 29 年 4 月 28 日、発明者: 熊田博明、中村哲之、重岡卓二、池田 毅、出願人: 大興製作所、筑波大学

(海外)

1. 中性子線減速材用フッ化物焼結体及びその製造方法、中国登録番号：ZL2014 8 0001165.9、中国出願番号：201480001165.9、2014年5月27日、登録日：2018年3月3日、発明者：熊田博明、中村哲之、重岡卓二、池田 毅、出願人：大興製作所、筑波大学
2. 米国：発明の名称：放射線減速材用MGF2-CaF2二元系焼結体及びその製造方法、出願番号：14/684,765、特許番号：9789335、整理番号：14-042-US、発明者：熊田博明、中村哲之、重岡卓二、池田 毅、出願人：大興製作所、筑波大学
3. 韓国：発明の名称：放射線減速材用MGF2-CaF2二元系焼結体及びその製造方法、Korean Patent No. 10-1973744, Korean Patent Application No.: 10-2015-0053612, 登録日：2019年4月23日、発明者：熊田博明、中村哲之、重岡卓二、池田 毅、出願人：大興製作所、筑波大学

⑤他制度への展開(予定も含めて記述可とします。その場合は、「採択研究者」を「申請研究者」と読み替えてください。)

無し

⑥その他(受賞、新聞報道、招待講演、展示会等の出展など)

1. 熊田博明、医療用中性子発生装置に関するプロモーション、ドイツ MEDICA 対日投資セミナー、2019年11月21日、デュッセルドルフ、口頭

## 9. その他特記事項

「7. 産学の対話の活用状況」でも報告したが、東京大学の高橋先生の研究グループと情報交換を行うことができ、実際に東京大学で開発したフラットパネルを当 iBNCT で照射して特性測手実験を行うための検討を行うことができ、実験に求められるビーム条件、施設要件の情報を得ることができた。この A-STEP 事業が終了した後は、東京大学、産総研と共同研究などを提携して、同グループが開発したフラットパネル検出器を当 iBNCT に持ち込んで中性子照射実験→イメージング研究を実施した。

また、茨城大学の小泉先生との連携関係も構築でき、中性子の小角散乱イメージング分野への利用に求められる要件などの情報を得ることができた。茨城大学のグループとは 2020 年度以降も連携関係を継続する。

### Ⅲ. 今後の展開

#### 10. 成果の今後の展開

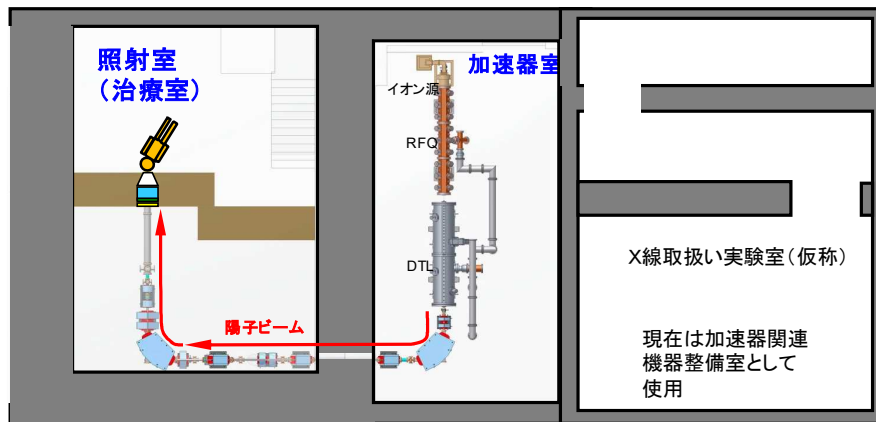
筑波大学がこれまで整備してきた医療用加速器中性子源装置:iBNCT は、本事業を通じて以下の特徴を有する性能、機能を確保した。

- ・40meV にピークを有する熱中性子を発生
- ・陽子の平均電流:1.4mA の運転条件下で熱中性子束:約 $1 \times 10^8$ (n/cm<sup>2</sup>s)を発生
- ・同運転条件下で90%以上の安定稼働
- ・陽子の平均電流:2.8mA で稼働し、中性子を発生。
- ・理化学研究所の RANS の約50倍以上(～100倍)の熱中性子を発生
- ・GLP に準拠した生物実験施設を併設
- ・筑波大学と共同研究を締結することで当該施設を用いた中性子照射実験を実施可能

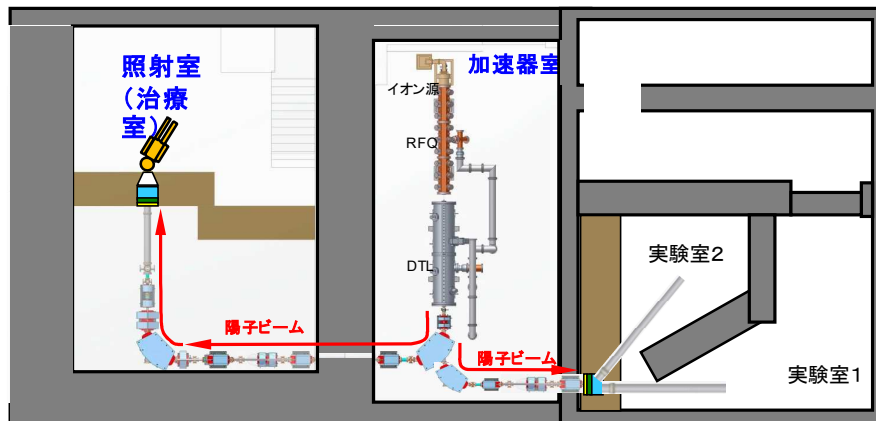
これを踏まえて、本事業終了後も、当該施設を利用して種々の中性子照射実験を実施したい研究グループを可能な限り受入れ、各種研究開発活動に寄与したい。将来的には当施設を共同利用施設として登録し、より多くのユーザーが容易に使える中性子実験施設として確立させたいと考える。特に当施設は立地的に J-PARC に隣接した場所にあることから、当施設で様々なシーズ研究を実施し、将来的により大きな成果が期待できるテーマを J-PARC に繋げられるような連携体制を構築できると良いと考えている。直近の目標としては、J-PARC と RANS を使って研究活動を実施している茨城大学の小泉先生や東京大学の高橋先生のグループと引き続き情報交換を行い、当施設を使った実験を実現させたい。

当施設は、現在は中性子を発生できる照射室が医療(BNCT)用の治療室しかないため、医療以外の実験を実施する場合も、この治療室を用いなければならず、将来的には治療を優先せざるを得ない状況が生じてくる。しかし、当装置を設置している「いばらき中性子医療研究センター」には他にも実験可能な部屋があり、ビームを分岐してその部屋に陽子ビームを導くことが可能である。そこにベリリウム標的と熱中性子発生用専用モデレータを設置することで、医療照射とは独立し、かつ、医療側の制限を受けることなく実験を実施できる環境を整備できる可能性がある(下図参照)。施設の遮蔽や各種許可申請など、様々な課題はあるが可能性を模索したい。さらには、隣接する駐車場側に別の実験建家を設置して陽子ビームを導くことができれば、より大規模な中性子実験(冷中性子発生も視野に入れる)を実施することも可能となる。これらの中性子ビーム装置、照射施設の拡張は、KEK、JAEA や茨城県、東海村との連携と協力が不可欠であり、予算の獲得も必要であるが、これらの働きかけを実施していきたい。

装置の普及の観点では、当グループは、医療用加速器中性子源の製造に関しては東芝エネルギーシステムズ社と連携しているが、本事業を通じて得られたノウハウ、技術は同社に技術移転するとともに、同社には医療用装置としてだけでなく、産業用・研究用の中性子源としても製造販売していくことを促したい。勿論、そのためには大幅な低コスト化が必要であるが、そのための検討を同社と KEK、JAEA とともに連携して実施していきたい。



現在の「いばらき中性子医療研究センター内のiBNCT施設レイアウト



陽子ビームを分岐し、産業・研究専用中性子場として使用する一案