

2

阪大核物理研究センターの現状と将来 (大阪大学核物理研究センター)

大阪大学核物理研究センター 教授 福田 光宏

核物理研究センターは 1971 年に全国共同利用センターとして発足し、当初より外部委員が半数以上を占める運営委員会や研究計画検討専門委員会を組織して開かれた運営や研究計画・将来計画の策定が行われてきた。1976 年から AVF サイクロトロンが共同利用が始まり、1991 年にはリングサイクロトロンが完成して超精密原子核物理実験や学際的な利用が行われている。2018 年には国際共同利用・共同研究拠点に認定された。

阪大核物理研究センターの現状と将来

大阪大学核物理研究センター

福田 光宏

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (Research Center for Nuclear Physics、略称 RCNP) は 1971 年に全国共同利用研究センターとして設立され、原子核物理学及び関連した学術分野のコミュニティから選出された学外委員が半数以上を占める運営委員会が設置されて RCNP の管理運営方針や研究体制の整備拡充などに関わる事項の審議を行っており、発足当初より開かれた組織運営を続けてきている。その下部組織である研究計画検討専門委員会においても学外委員が半数以上を占め、RCNP における研究計画の立案や将来計画の策定、加速器施設の共同利用に関わる事項などについて協議している。

1973 年に AVF サイクロトロン (K 値=140MeV (He イオンの最大加速エネルギーに相当)) [1]が完成し、1976 年から本格的な共同利用実験が始まった。1991 年には後段のリングサイクロトロン (K 値=400MeV) [2]が完成して高エネルギーのイオンビームも利用可能になり、超高分解能エネルギー分析用スペクトロメータ “Grand-RAIDEN” との組合せにより超精密原子核物理実験が可能になった。近年、短寿命放射性同位体 (radioisotope、略称 RI) を用いた核化学・核医学研究、400MeV の陽子ビームにより二次的に生成した中性子やミューオンを用いた物質科学研究、半導体デバイスのソフトエラー及びハードエラー評価試験などでの利用もかなり増えてきており、原子核物理学のみならず、学際的な量子ビーム応用が幅広く行われるようになった。外部研究機関との連携協力も強化しており、SPring-8 におけるレーザー電子光施設 (LEPS)、J-PARC のハドロン実験施設、神岡二重ベータ崩壊実験施設なども整備し、十兆分の一センチメートルという極微のサブアトム世界を支配する基本法則の解明を目指した基礎物理学の実験・理論研究を展開している。2018 年には国際共同利用・共同研究拠点に認定され、「国際サブアトム科学研究拠点」として国内のみならず、世界の研究者や研究機関との連携をより一層深めている。

現在、大阪大学は第 3 期中期目標期間にあり、RCNP においてもサブアトム科学に限らず、新たな視点での多角的な研究・教育の取り組みを展開しており、学術的な先進性を追求した基礎研究の推進はもとより、革新的な量子ビーム応用を切り拓いていく過程において、将来を担う優秀な若手研究者の人材育成や産学共創による新たなビジネス領域の創生などを目指した挑戦的なプログラムなどにも取り組んでいる。

2. RCNP 加速器施設の実験室と主な実験装置

RCNP 加速器施設の建屋は、1973 年に完成した AVF サイクロトロン棟と 1991 年に増設されたリングサイクロトロン棟から構成されている。図 1 に RCNP 加速器施設の鳥瞰図を示す。AVF サイクロトロン棟には核反応実験室 (現在の N 実験室)、核構造実験室 (M 実験室)、エネルギー高分解能実験室 (W 実験室)、核分光実験室 (S 実験室) の 4 つの実験室が用意され、陽子、重陽子、He イオンなどの軽イオンビームを中心とした原子核物理実験が精力的に行われ



図1 RCNP 加速器施設の鳥瞰図

ていた。その後、AVF サイクロトロンを後段のリングサイクロトロンの入射器として用いるために N 実験室を入射ビームライン室に改造し、現在では M、W、S 実験室の 3 室で実験が可能である。リングサイクロトロン棟には、西実験室、東実験室、中性子実験室の 3 室が設けられ、陽子で最大 400MeV、重陽子や質量数 4 以上のイオンで最大 100MeV/核子まで加速可能である。2004 年度に行われたアップグレード工事により、AVF サイクロトロンで加速したビームを西実験室、東実験室、中性子実験室へ直接輸送できるバイパス・ビームコースを増設し、例えば陽子の場合には最小 5MeV から最大 400MeV までの幅広いエネルギー範囲でビームが利用できるようになった。

リングサイクロトロンでは、主電磁石メインコイルの冷却水温度の変動を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内に抑える制御を行うことによって $\Delta B/B=10^{-6}$ オーダーの高い磁場安定性を実現している [3]。加えて、基本波加速周波数の 3 倍の高調波周波数の加速電圧を用いて加速粒子のエネルギー利得を RF 位相幅 $\pm 10^{\circ}$ 以内の時間範囲において均一化するフラットトップ加速法 [4] と組み合わせることにより $\Delta E/E=10^{-4}$ オーダーのビームエネルギー幅も達成している。この良質なビームを西実験室の WS コースへ輸送し、ターゲット上流のビーム輸送光学とターゲット下流の高分解能スペクトロメータ “Grand Raiden” を dispersion matching [5, 6] させることにより、世界最高レベルの $\Delta E/E=5 \times 10^{-5}$ の超高分解能原子核実験が可能である。これは、例えば 300~400 MeV 陽子ビームで $\Delta E=20\sim 30\text{keV}$ FWHM のエネルギー分解能に相当する。Grand-RAIDEN は、2 台の分析電磁石やターゲットから放出された粒子の位置を測定するワイヤーチェンバーなどから構成され、これらは台車の上に載せられている。ターゲットに対して台車の角度を変えることにより角度分布も取得できるようになっている。これにより、原子核構造と核反応過程の詳細な解析が可能になり、従来の実験装置では知り得なかった微細な原子核の挙動が高精度で見えるようになってきた。同じ西実験室には 392MeV の陽子ビームを用いた白色中性子源とミューオン源 MuSIC も整備されている。

東実験室では、サイクロトロンで加速した重イオンビームをターゲットに照射して半減期の短い不安定核を生成し、分析電磁石とスリットの組合せにより、ターゲット下流へ放出された多種類の不安定核の中から 1 種類だけ選び出してさらに下流に設置されたターゲットへ導いて原子核反応を起こさせる実験が行われている。世界共通に同じ規格で製作された Ge 検出器を世界各国の研究機関から借用してこの二次反応ターゲットの周りを囲い、大きな立体角で極めて稀な原子核反応により放出されるガンマ線の測定を行う CAGRA プロジェクトも国際協力により実施している。東実験室には汎用のビームラインと大型散乱槽も整備されており、他大学の学部生の教育用ビームタイムなどにも利用されている。

中性子実験室には、ターゲットホルダを磁極間隙にセットされた偏向電磁石が用意されており、磁極の中心軸に沿ってターゲットを移動できる駆動システムが備えられている。このターゲットの前方には 10cm 角の開口が設けられたコンクリート製のシールド扉が設置されており、偏向電磁石の磁場により曲がりながら入射してきた陽子ビームがターゲットと核反応を起こして中性子がいろんな角度に放出され、それらの中からシールド扉の開口部が構えた方向に飛び出てきた中性子だけを扉の奥にある長さ 100m のトンネルへ導くようになっている。トンネル内には台車に乗せたプラスチックシンチレータや液体有機シンチレータが設置されて、ターゲットからの距離を変えることによって飛行時間法 (Time-Of-Flight 法) により中性子のエネルギー分布の角度依存性などを調べることができる。高エネルギー陽子ビームと Li ターゲットの核反応で得られる中性子は、陽子ビームの入射エネルギーに近いところにピークを持つ準単色中性子ビームとして利用することができ、中性子検出器のエネルギー較正や様々な材質の遮蔽体の中性子遮蔽性能の評価などにも利用されている。

3. VF サイクロトロンのアップグレード

AVF サイクロトロンが 1973 年に完成してから約 50 年が経過し、サイクロトロンを構成する機器の老朽化は著しく、特にサイクロトロン内部の冷却水配管からの漏水トラブルが発生して加速箱内の高真空状態が保てない重故障が時折発生していた。これまでは部分的に機器を解体して補修を行うなど、応急的な対処療法で急場を凌いできたが、機器そのものを更新せざるを得ないような事態になった場合には長期間の加速器停止も覚悟せざるを得ず、非常に悩ましい状況に陥っていた。そこで、2019 年 2 月に意を決して加速器運転を停止し、AVF サイクロトロンの大々的なアップグレードに着手した。AVF サイクロトロンの更新に当たっては、まだ健全と思われる本体電磁石の鉄心や磁極、メインコイルはそのまま再利用することとし、それら以外の機器は全て更新することにした。その際、原状復帰により元々の性能を維持することはせず、加速器の性能を向上させてビーム強度をこれまでの 10 倍以上に増強すべく、全面的な再設計を行うこととした。図 2 にアップグレードによる効果を示す。

図 3 に AVF サイクロトロンのアップグレードの仕様を示す。ビーム強度を増やすためには、イオン源の加速電圧を従来の 10~15kV から 50kV 位まで上げて取出ビーム電流を増やすと共に低エミッタンス化を図り、AVF サイクロトロン中心領域への入射効率を向上させる必要がある。また、加速領域におけるエネルギー利得を 2 倍にしてターンセパレーションを大きくし、サイクロトロンからビームを取り出す際のデフレクターでのビーム損失を極力減らしてビームの引き出し効率を改善することなども重要である。そこで、全てのイオン源の絶縁性能を改良して加速電圧を 50kV に上げると共に、入射ビームラインの偏向・集束電磁石の電源を更新して磁場を上げられるようにした。AVF サイクロトロンの中心領域も 50kV で加速された入射ビームを受け付けられるようにインフレクター電極とその周りの中心領域電極の設計

を全面的に見直した。共振器も従来の開き角 180° のシングル・ディー電極から開き角 87° のダブル・ディー電極に置き換え、しかも正弦波型加速電圧の最大振幅で加速できるように加速ハーモニクス $h=2$ を基本とした設計に変更した。これにより、RF 周波数帯域を従来の 5 ~ 18MHz から 17~36MHz へ変更し、よりコンパクトな共振空洞で 60kV の最大加速電圧が発生できるように設計を行った。アップグレード後の新しい AVF サイクロトロンとリングサイクロトロン (仕様変更無し) の主なパラメータを表 1 に示す。

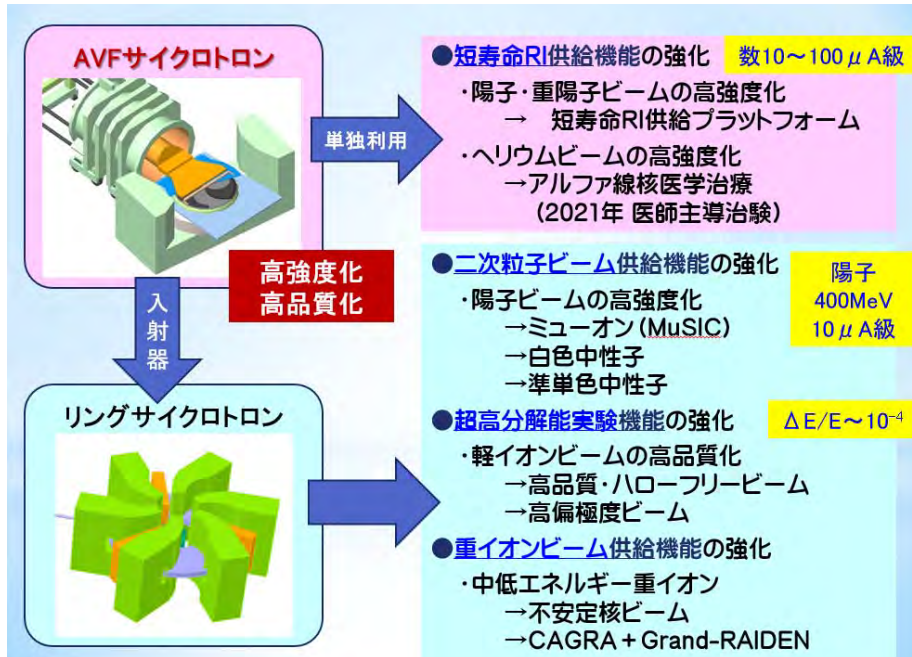


図2 AVF サイクロトロンのアップグレードによる効果

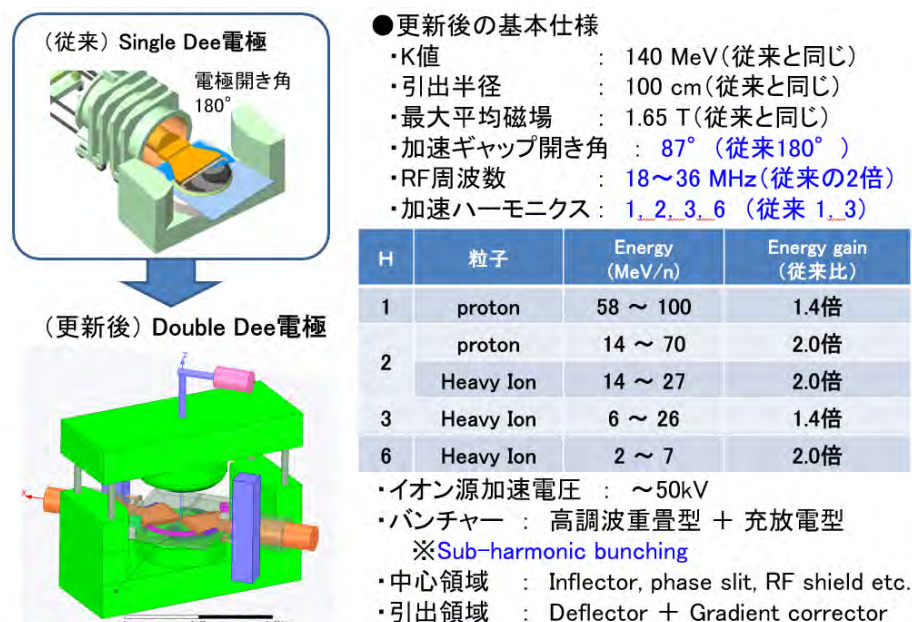


図3 AVF サイクロトロンのアップグレードの仕様

表1 AVFサイクロトロンとリングサイクロトロンの主なパラメータ

パラメータ	AVF サイクロトロン	リングサイクロトロン
K 値 (MeV)	140	400
最大平均磁場 (テスラ)	1.6	1.75
引出半径 (m)	1	4
電磁石重量 (トン)	400	2200
主共振空洞のタイプ	同軸円筒型 ショート板駆動方式	シングルギャップ箱型 パネル駆動方式
主共振器の数	2	3
加速周波数 (MHz)	17~36	30~52
最大加速電圧 (kV)	60	500
加速エネルギー (MeV/核子)	陽子 2~80 重イオン 2~35	陽子 60~400 重イオン 27~100

4. 短寿命 RI 供給プラットフォーム

近年、核化学・核医学分野に限らず、広範な学術分野において短寿命 RI の利用が拡大してきており、短寿命 RI のニーズは高まる一方である。そんな中、RCNP が中核機関となって理化学研究所仁科加速器研究センター (RIBF)、東北大サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC)、同電子光物理学研究センター (ELPH)、量子科学研究開発機構量子医科学研究所 (NIRS)、同高崎量子応用研究所 (TIARA) が密接に連携しながら、特に科研費を獲得している研究課題に対して年間を通じた短寿命 RI の安定供給と RI の安全な取り扱いのための技術的な支援を行うための「短寿命 RI 供給プラットフォーム」を 2016 年度に立ち上げた。本プログラムは、科研費新学術領域研究 (研究領域提案型) 『学術研究支援基盤形成』事業における研究基盤リソース支援プログラムの支援を受けながら運営しており、今後も継続して本取り組みを運営していけるように国へ働きかけを行っているところである。

5. アルファ線核医学治療研究のための At-211 製造

At-211 (半減期 7.2 時間)、Ac-225 (半減期 10 日)、Ra-223 (半減期 11.4 日) などのアルファ線を放出する RI を用いたアルファ線核医学治療が注目を集めており、大阪大学においても医学系研究科、理学研究科、RCNP が連携して At-211 の実用化を目指した基礎研究を進めてきた。これまでに、RCNP や RIBF、NIRS、TIARA で製造された At-211 を化学分離・精製して新しい治療薬剤を合成し、その有効性と安全性を十分に示す非臨床試験結果が得られている。この研究成果を踏まえ、アスタチン化ナトリウム ([211At]NaAt) 注射液を用いた医師主導治験が間もなく阪大病院にて始まろうとしている。RCNP では、GBq 級の At-211 大量製造を目指して AVF サイクロトロン及びビーム輸送ライン、照射装置のアップグレードを進めている。

6. 半導体デバイスソフト・ハードエラー評価試験のための白色中性子源とミューオン源

IoT 社会の発展と共に、今や膨大な数の電子デバイスが世界中で利用されている中、上空から地上へ降り注いでいる宇宙線起源の中性子がたまたま電子デバイス内に侵入して原子核反応を生じると荷電粒子を放出してデバイス内に誤信号などを発生させる現象がどこかで発生している。この中性子がもたらす半導体デバイスのソフトエラーやパワーデバイスのハー

ドエラー現象は様々な産業機器の安全性・信頼性を揺るがすことになり、社会的にもかなり深刻な問題として受け止められている。RCNPの西実験室には、厚さ数mの分厚いコンクリート壁に囲まれたエリアに厚さ65mmのタングステンターゲットを設置し、392MeVの陽子ビームを照射して核破砕反応により中性子を発生させ、陽子ビームの入射方向に対して30°の方向の壁に直径108mmの開口を設けて中性子を西実験室内へと導いて半導体デバイスに照射する白色中性子源が整備されている。RCNPで得られる白色中性子のエネルギー分布は、空から地上に到達する中性子のエネルギー分布とほぼ同じであり、得られる中性子強度は地上中性子の約1億倍にも匹敵することから、半導体デバイスメーカーなどが効率的にソフトウェアやハードエラーの評価試験を精力的に行っている。

昨今、中性子と共に地上に降り注ぐミュオンに起因したソフトウェアの発生確率が無視し得ないという実験結果も出ていることから、西実験室のミュオン源 MuSIC でも半導体デバイスの照射試験が行われ始めている。MuSICでは、中心磁場が3.5Tの超伝導ソレノイド電磁石の中心部に設置されたグラファイトターゲットに392MeVの陽子ビームを照射し、核反応によっていろんな方向に放出されたパイ中間子やミュオンをソレノイド磁場に絡めるようにして輸送している。パイ中間子は飛行中にミュオンに崩壊することからビーム輸送ラインの末端では高強度のミュオンビーム照射が可能になる。これまでに、素粒子物理学実験だけでなく、 μ SR法による物性研究、高感度な非破壊元素分析などにも利用されており、共同利用実験の申し込み件数が年々増えてきている。

7. おわりに

長年にわたり RCNP は、世界に開かれた原子核実験施設として国内外の多数の実験者を迎え入れて超高分解能スペクトロメータを始めとした様々な実験装置を用いた原子核実験が行われてきた。最近では、短寿命 RI 供給や中性子源・ミュオン源の利用なども盛んになってきており、今後も幅広い分野での多様なニーズに応えるべく、加速器施設の拡充・増強を進めて行く予定である。特に、AVFサイクロトロンへのアップグレードによりビーム強度を数倍から10倍以上に増強できることから、共同利用・共同研究における量子ビーム利用の高効率化とビームタイム短縮に寄与しうるものと考えている。限られた資金やリソースの中で施設利用を拡大していきながら、国際共同利用・共同研究拠点としての役割を十二分に発揮していくつもりである。

参考文献・資料

- [1] M. Kondo, “AVF Cyclotron”, RCNP Annual Report 1976, pp1-5.
- [2] I. Miura et al., “The Research Center for Nuclear Physics Ring Cyclotron”, Proc. PAC1993, Washington D.C., USA (1993) pp1650-1654.
- [3] S. Ninomiya et al., “RCNP Techniques for Producing Ultra-Precise Beams”, Proc. Cyclotrons2001, East Lansing, Michigan, USA (2001) pp94-96.
- [4] T. Saito et al., “The Flat-topping System for the RCNP Ring Cyclotron”, Proc. Cyclotrons1995, Cape Town, South Africa (1995) pp169-172.
- [5] M. Fujiwara et al., “Magnetic Spectrometer Grand Raiden”, Nucl. Instrum. And Methods A422 (1999) pp484-488.
- [6] T. Wakasa et al., “High Resolution WS Beam Line at RCNP”, Proc. Cyclotrons2001, East Lansing, Michigan, USA (2001) pp458-460.

講演者略歴



福田 光宏 (ふくだ みつひろ)

所 属 大阪大学 核物理研究センター 教授
住 所 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 10-1
連 絡 先 TEL/FAX : 06-6879-8931、E-mail:mfukuda@rcnp.osaka-u.ac.jp
学 職 歴 1983年 大阪大学 理学部 物理学科卒業
1988年 博士(理学)(大阪大学)
1988年 日本原子力研究所 高崎研究所
2006年 大阪大学 核物理研究センター 現在に至る
研究・活動 加速器物理学・工学、量子ビーム科学
分野など