

## QST における先進核融合中性子源 (A-FNS) 計画

### PROJECT OF ADVANCED FUSION NEUTRON SOURCE (A-FNS) IN QST

春日井敦<sup>#</sup>, 粕谷研一, 小林創, 近藤浩夫, 権セロム, 中村誠, 落合謙太郎, 太田雅之,  
小柳津誠, 朴昶虎, 佐藤聡, 手塚勝

Atsushi Kasugai\*, Kenichi Kasuya, Hajime Kobayashi, Hiroo Kondo, Saerom Kwon, Makoto Nakamura,  
Kentaro Ochiai, Masayuki Ohta, Makoto Oyaidzu, ChangHo Park, Satoshi Sato, Masaru Teduka  
QST/Rokkasho Fusion Institute

#### Abstract

The action plan based on the "Promotion of fusion DEMO reactor research and development in Japan" which is the Japanese strategy of fusion reactor program shows it is necessary to demonstrate the neutron irradiation test of the materials for the transition judgement for construction of a DEMO fusion reactor before 2035, which is the year ITER will demonstrate half-million kW output. For this mission, completion of the design and construction of fusion neutron sources is required by about 2030. Domestic plan to construct advanced fusion neutron sources (A-FNS) with 40 MeV - 125 mA CW deuteron beam and liquid lithium target are on going in QST/Rokkasho, based on the results of IFMIF/EVEDA project with international collaboration between Japan and EU.

#### 1. はじめに

重水素と三重水素による核融合反応ではヘリウム原子核とともに 14 MeV の高速中性子が発生する。核融合原型炉では、核融合反応で発生する 14MeV の高速中性子のエネルギーを熱に変えて冷却水を熱し発電を行う。一方炉心を取り囲む周りの壁には高速中性子が連続的に直接照射し、材料の原子に中性子が衝突することで弾き出し(格子間原子等を生成)と、核変換(H や He 原子等)が起こる。生じた点欠陥が集まり、材料の組織に変化が現れると、高温で膨れる、低温で脆くなるといった特性変化が生じる。14 MeV 中性子は、原子炉の中性子より衝突の連鎖が起きやすく核変換を起こしやすいという特徴を持つ。そのため、核融合エネルギー実現のためには、14 MeV の中性子の重照射による材料特性影響を検証することが不可欠とされる。

核融合反応で発生する 14 MeV の高速中性子を模擬する手段として、重陽子を 40 MeV まで加速しリチウムターゲットに当たる加速器駆動型核融合中性子源が検討されてきた。特に 1990 年から 2003 年にかけて国際エネルギー機関 (IEA) のプログラムに基づいた国際核融合材料照射施設 (IFMIF: International Fusion Materials Irradiation Facility) の概念設計活動が実施され[1]、さらに 2007 年からは日欧による国際共同事業である核融合分野における幅広いアプローチ (BA) 活動の一環として、IFMIF/EVEDA (IFMIF の工学実証・工学設計活動 (EVEDA :Engineering Validation and Engineering Design Activities) ) が開始された[2]。これは IFMIF の工学設計ならびに主要機器の設計・製作・試験を行い、IFMIF 建設判断に必要な技術実証を行うものである。

日本国内の実施機関として量子科学技術研究開発

機構 (以後、QST) は、IFMIF/EVEDA 事業を進め、これまでの BA 活動の中で、(1) 重陽子線形加速器部の入射器と高周波四重極線形加速器、9 MeV までの超伝導線形加速器からなる原型加速器、(2) 目標速度の液体リチウム標的膜の生成・維持を実証する 1/3 規模の試験施設、(3) 中性子照射部主要機器の実機大試作機の製作と性能確認・要素技術等を開発している。特に IFMIF 原型加速器の実証では、高周波四重極線形加速器における陽子ビームの加速試験を 2018 年 6 月より開始したところであり[3, 4]、2020 年 3 月までに超伝導加速器まで含めた統合ビーム試験を実施する予定である。

この IFMIF/EVEDA 事業の成果を有効に活用し、IFMIF の半分の強度を持つ先進核融合中性子源 (A-FNS) を早期に実現させる計画が日本国内で検討されている。本論文では A-FNS の概要及び目的、検討の進展について報告する。

#### 2. 核融合中性子源 A-FNS の目的と概要

##### 2.1 文科省核融合科学技術委員会のアクションプランとロードマップ

文部科学省の下に設置されている核融合科学技術委員会では、核融合原型炉の推進に向けて、原型炉段階への移行判断のためのチェックアンドレビュー (C&R) 項目を列挙し、目標を定めている。そのなかで原型炉に関わる材料開発として、炉材料の候補材である低放射化フェライト鋼の 20dpa 照射データ、ブランケット及びダイバータ機能材料の初期照射データ、ブランケットのトリチウム挙動評価技術の検証、計測・制御機器材料の耐照射性評価を 2035 年頃までに取得するように定めている[5,6]。そのためには、核融合中性子源が必要であり、そのアクションプランでは、2020 年頃の第 1 回中間 C&R で概念設計の完了、2025 年頃の第 2 回中間 C&R で核

\* kasugai.atsushi@qst.go.jp

融合中性子源の建設開始判断、及び材料照射データ取得計画の作成を行うこととしている。2018年にはアクションプランに基づいたロードマップが策定され、文科省で承認された。ロードマップには「核融合中性子源 (A-FNS)」について、下記のようにまとめられている。

- (1) 原型炉開発には、炉内中性子環境を模擬し、材料データ取得が不可欠である。
- (2) 日欧でそれぞれ核融合中性子源の構想検討が進んでいる (日: A-FNS, 欧: DONES)。
- (3) 第2回中間C&Rで建設移行を判断する。
- (4) IFMIF/EVEDAの成果を活かし、国際協力を得ながら、A-FNS構想を具体化すること。

このように国の施策に基づいて、日本として核融合中性子源を検討することとし、核融合材料開発だけにとどまらず、中性子の医療・産業利用も視野に入れた先進核融合中性子源の検討を開始した。

## 2.2 A-FNSの概要

図1にA-FNSの構成と図2に全体システム概要を示す。A-FNSは大きく分けて、重陽子を40MeVまで加速する重陽子線形加速器、ターゲットである液体リチウムを循環させる液体リチウムループ、発生した中性子を照射する照射部、遠隔保守系、照射後試験施設、トリチウム処理系から構成される[7]。

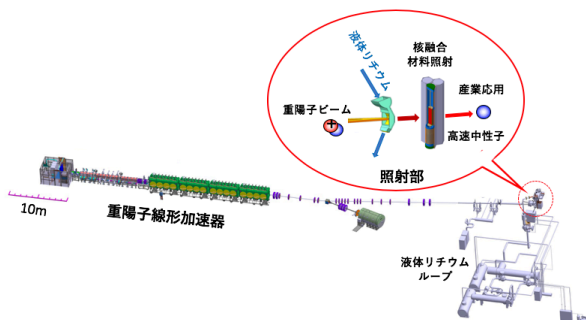


Figure 1: Conceptual view of A-FNS.

その基本コンセプトは、加速器系はIFMIFの1ライン分(125mA)とし、設計はIFMIFの中間工学設計をベースにする。国際協力を進めるIFMIF/EVEDAの成果を活用し国内メーカーの技術力を結集してA-FNSの加速器系として再構築する。ターゲット系はIFMIF/EVEDAの成果を反映させ、純化系については後述する国際協力を進めるBAフェーズIIにおいてR&Dを実施する。照射モジュール系は核融合材料試験用を中心に様々なモジュールを検討を行い、日本独自案とするため国内活動として実施する。メンテナンスや材料交換など、遠隔保守システムを採用しする。また、産業応用可能な多用途中性子源とする。これらは大学および産業界との連携の下、オールジャパン体制で行うこととしている。

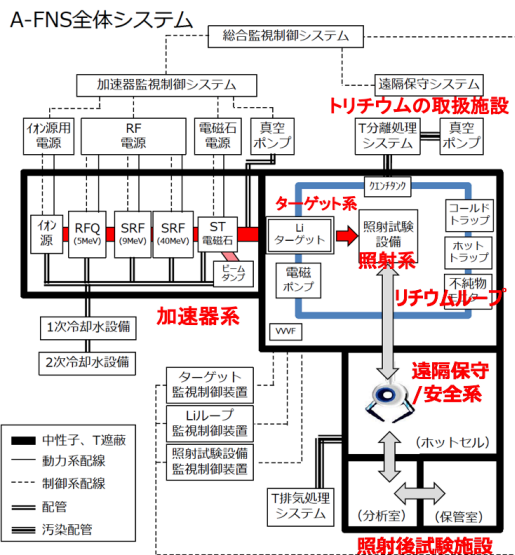


Figure 2: System diagram of A-FNS.

表1にA-FNSの基本パラメータを示す。IFMIFと同様、40MeVの重陽子ビームと液体リチウムターゲットによるd-Li核反応による高速中性子を発生させるが、IFMIFが加速器2系統で総電流250mAを確保するのに対して、A-FNSは加速器1系統とし、重陽子ビームの電流はCWで125mAとしている。また初段の加速器については、IFMIF/EVEDAの成果である原型加速器と同じ構成とし、後段の40MeVまでの加速器を新規で設計する。中性子発生率はリチウムターゲットの背面にあるバックプレートの直後で、中性子強度  $6.8 \times 10^{17}$  個/秒であり、平均フラックス  $6.0 \times 10^{14}$  個/cm<sup>2</sup>/秒としている。図3にバックプレート直後でのエネルギースペクトルに対する中性子フラックスの計算値を示す。14MeV付近をピークとした高速中性子が発生するのが示される。鉄に対する弾き出し損傷量(dpa)に対するヘリウム生成量、いわゆるHe/dpa比は12-13程度で、核融合中性子による材料照射条件を模擬できることになる。材料照射試験の観点からビーム照射面積(フットプリント)は大きくとるのが理想的だが、これまでの液体リチウムループの技術開発の成果をもとに考えれば、縦5cm、横10cmとIFMIFの半分となる。A-FNSでは、10dpa/年以上の照射量を確保できる見通

Table 1: Basic Parameters of A-FNS

Beam	Particle Energy Current Foot print Incident angle Availability	Deuteron 40 MeV 125 mA (CW) 200 x 50 mm <sup>2</sup> Normal 33% at least
Target	Material Temp. Velocity Thickness Window	lithium Liquid target (jet) 250 °C 10-15 m/s at target 25 mm Free surface (no window)
Neutron	Intensity  Average flux Helium P. R Displacement HePR/dpa	$6.8 \times 10^{16}$ neutron/s  $6.0 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> /s 312 appm/fpy 24.7 dpa/fpy 12.6

fpy: full power year

しであり、材料照射以外にもトリチウム回収試験を中心とした増殖ブランケットに関する照射試験等のアクションプランに示された各種照射試験も実施する。

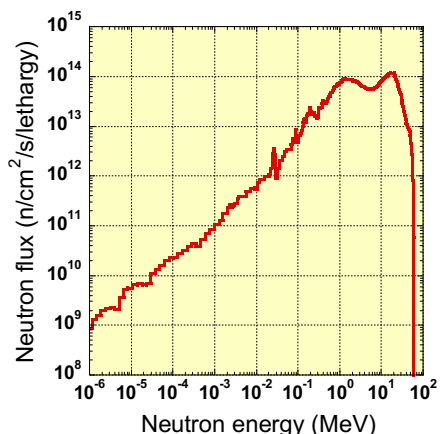


Figure 3: Neutron flux spectrum as a function of the neutron energy at the lithium target back plate.

### 3. A-FNS の検討状況

#### 3.1 加速器系

A-FNS の加速器系については、現在進行中の IFMIF 原型加速器の試験結果を踏まえて総合的に判断することになる。基本的には IFMIF 中間工学設計報告書をベースとして検討することになる。重陽子の生成、低エネルギービーム輸送系、高周波四重極加速器、中間エネルギービーム輸送系、9MeV までの加速を行う初段の超伝導加速器（クライオモジュール）は、現行の原型加速器と同様の設計になるであろう。9MeV から 40MeV にするには、3 式のクライオモジュールを追加する案が有力である。一例として、図 4 に A-FNS で想定される超伝導加速器の構成を示す。ビーム設計は IFMIF 中間工学設計報告書ですで行われており、SRF の構造は GenLinWin コードを用い、幾何学的キャビティの  $\beta$  値、遷移エネルギー、長さあたりの共振器数の最適化を満たしながら、最小の空洞を有する最短の線形加速器となるように設計され、ビームシミュレーションは TraceWin コードを用いて、106 個以上のマクロ粒子でのマルチパーティクルシミュレーション（ハローマッチング、エミッタンスマッチング）を実施している。また放射化等を防ぎメンテナンスの制約から、損失は 1W/m 以下に抑制することを設計目標とした。第 1 クライオモジュールは現在製作中の IFMIF 原型加速器と同じ設計で、1 つのソレノイドと 1 つの半波長共振器の 8 周期 ( $\beta=0.094$ ) で構成される。第 2 クライオモジュールは 1 つのソレノイドと 2 つの半波長共振器 ( $\beta=0.094$ ) の 5 周期、

第 3、4 クライオモジュールは 4 つのソレノイド周期と 3 つの半波長共振器 ( $\beta=0.166$ ) で構成され、 $\beta$  値の増加に伴い構成が変わる。

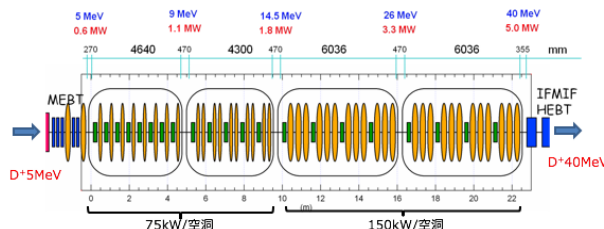


Figure 4: Conceptual design of SRF linac of A-FNS.

#### 3.2 液体リチウムターゲット系

IFMIF のターゲットである液体リチウムターゲットに関しては、IFMIF/EVEDA 事業として日欧の国際協力の下、2010 年度に世界最大の液体リチウム試験ループを原子力機構大洗研究所内に完成させ、工学検証試験を 2014 年まで実施した。ターゲット性能として必要な高速リチウム流を発生させて流れの安定性とループ全体の長時間の安全・健全運転を実証した。これまでに 1300 時間以上の流動安定性を実証し、真空中 (373Pa, 250°C) で厚さ 25mm のリチウム流を秒速 20m という高速で安定に生成することに成功している[8]。今後は BA フェーズ I の期間では未実証であった、リチウム純化系、リチウム安定性詳細評価、構造健全性評価を中心に、2020 年から 5 年間の BA フェーズ II の日欧協力の下で試験検証する計画である。

#### 3.3 照射モジュール系

IFMIF の照射モジュール系の設計は、中性子フラックスのレベルに応じた照射モジュールを検討していたが、A-FNS ではアクションプランで示される照射試験項目を達成するため、様々な試験モジュールを扱えるように照射モジュールの構造を IFMIF の中間工学設計から大きく変更し、さらにメンテナンス性を考慮した設計としている。また IFMIF の照射系と大きく異なるのが、高速中性子を用いた医療・産業利用への展開である。図 5 に示すように、A-FNS は核融合炉材料開発だけでなく、連続運転の強力中性子を広く提供することができるため、従来の原子炉を利用した中性子照射から置き換わる可能性を秘めている。また、他の中性子源と異なり強度が大きいと、特に産業・医療用 RI の大量製造に適している特徴を持つ[9]。多用途な中性子源とすることで、他分野の基礎研究・産業医療・エネルギー応用までを網羅でき、特にこれまではなかった高速中性子を利用した新たな中性子研究・産業創生への展開が期待できる。

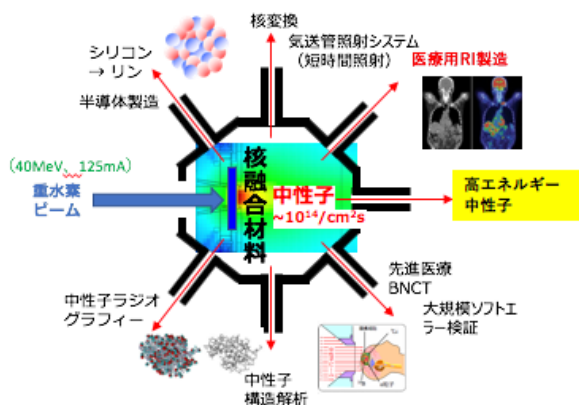


Figure 5: Application of neutrons in A-FNS.

#### 4. 今後の予定

文科省核融合科学技術委員会のアクションプランとロードマップに従い、今後は進めていくことになる。図 6 にロードマップに沿った A-FNS のスケジュールを示す。

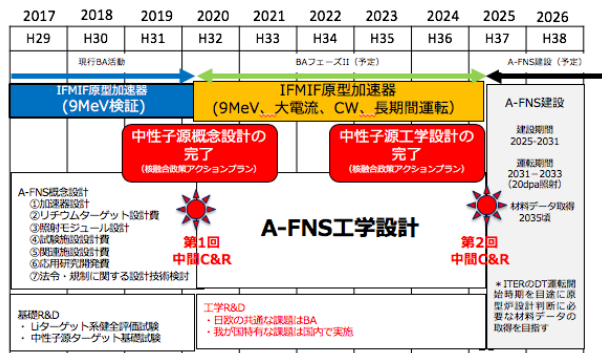


Figure 6: Schedule of A-FNS.

2020年3月までで現行のBA活動のフェーズIが完了し、その後5年間はBAフェーズIIとして、日欧の核融合中性子源に関する共通の課題について工学R&Dを実施する。特に加速器系についてはこれまでに整備した原型加速器の9MeV、大電流、長時間運転の実証と、信頼性確認試験を5年間の間に実施し、A-FNSの加速器系の設計に技術的裏付けを与える。また液体リチウムターゲット系についてもBAフェーズIIの国際協力の下、純化系及び構造健全性評価を中心にR&Dを行いA-FNSの設計に資する。一方2020年までにA-FNSの概念設計を完了することを目標としており、第1回中間C&R(2020年)ではA-FNSの建設推進判断を実施し、A-FNSの工学設計を進める。その後加速器の技術実証と工学設計を完了を経て、第2回中間C&R(2025年)を実施し、A-FNSの建設移行判断を行い、建設設計と建設を速やかに進めることとなる。

そして2035年頃に核融合原型炉の建設判断に必要な材料照射試験データを取得するとともに、国内の大学及び産業界のコミュニティの協力を得つつ、A-FNSを医療・産業利用できるように整備していく予定である。

#### 参考文献

- [1] H. Matsui *et al.*, "Present Design and R&D Status of International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)", J. Plasma Fusion Res. Vol.82, No.1 (2006)3-6.
- [2] J. Knaster *et al.*, "Materials research for fusion", *Nature Physics* vol12(2016), 424-434.
- [3] K. Kondo *et al.*, "RFQ Beam commissioning of IFMIF/EVEDA prototype accelerator", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2017, WEOLP02.
- [4] A. Kasugai *et al.*, "Status of IFMIF prototype accelerator", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2017, FSP015.
- [5] H. Yamada *et al.*, "Development of strategic establishment of technology bases for a fusion DEMO reactor in Japan", *Journal of Fusion Energy* 35 (1) (2016) 4-26.
- [6] H. Yamada *et al.*, "Japanese endeavors to establish technological bases for DEMO", *Fusion Engineering and Design* 109-111 (2016) 1318-1325.
- [7] K. Ochiai *et al.*, "IFMIF/EVEDA Activity of Broader Approach and Future Plan", J. Plasma Fusion Res. Vol.92, No.4(2016)274-277.
- [8] H. Kondo *et al.*, "Validation of liquid lithium target stability for an intense neutron source", *Nucl. Fusion* 57 (2017) 066008 (10pp).
- [9] M. Ota *et al.*, "Investigation of Mo-99 radioisotope production by d-Li neutron source", *Nuclear Materials and Energy*, Vol15(2018), 261-266.