

小特集 最近の核融合中性子工学の進展

5. 幅広いアプローチ (BA) 活動 IFMIF/EVEDA と今後の展開

5. IFMIF/EVEDA Activity of Broader Approach and Future Plan

落合 謙太郎, 近藤 恵太郎, 春日井 敦, 大平 茂

OCHIAI Kentaro, KONDO Keitaro, KASUGAI Atsushi and O'HIRA Shigeru

\*日本原子力研究開発機構 六ヶ所研究所 核融合炉材料研究部

(原稿受付: 2015年12月15日)

本章では、日本と欧州とによる国際共同事業「幅広いアプローチ (BA) 活動」のひとつである IFMIF/EVEDA の現状を紹介し、BA 活動後のプロジェクトとして検討しているポスト BA 中性子源計画について中性子工学の立場から解説する。

Keywords:

Broader Approach, IFMIF/EVEDA, LIPAc, ELTL, fusion neutronics source, post-BA

核融合中性子照射による炉材料試験は核融合炉設計のための基盤データを取得する上で重要である。核融合原型炉設計では初期の運転でもブランケットの平均中性子壁負荷を  $1 \text{ MW/m}^2$  と想定しており、特に DT 高速中性子照射環境下でも耐えうる材料の照射試験施設ならびに材料規格の整備の必要性が1980年代から国際的に提案されてきた。

そのような背景のもと、主に1990年から2000年代初期にかけて国際エネルギー機関 (IEA: International Energy Agency) のプログラムに基づき、国際核融合材料照射施設 (IFMIF: International Fusion Material Irradiation Facility) の概念設計活動等 [1] を経て、2007年より10年間、日本と欧州による国際共同事業である幅広いアプローチ (BA) 活動の一環として始まった IFMIF の工学実証・工学設計活動 (EVEDA: Engineering Validation and Engineering Design Activities) において、IFMIF の工学設計活動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開始した [2]。

国内の実施機関である日本原子力研究開発機構 (以後、原子力機構) は、青森県六ヶ所村に新たに設置した六ヶ所核融合研究所 (国際核融合エネルギー研究センター) において、IFMIF 設計活動ならびに原型加速器 (LIPAc: Linear IFMIF Prototype Accelerator) の開発を進めている。またリチウムターゲットループ試験装置 (ELTL: Experimental Lithium Target Loop) を原子力機構の大洗研究開発センターに建設し、2014年にそのタスクを完了している [3]。

BA 活動は2017年5月末に終了予定であるが、現在延長が BA 運営委員会で検討されており、2019年までの協定延長が検討されている。また現行 BA 活動終了後、2020年以降の次期活動展開についても BA 運営委員会内にポスト BA ワーキンググループを設置し、各専門家によって展開

\*現在の所属: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

が検討されている。その中の主な活動のひとつとして IFMIF/EVEDA 活動で培った知見や資源を有効に活用し、核融合原型炉初期運転までに必要な材料照射データを取得可能な核融合中性子源施設の建設に向けたシナリオ作りが日欧で検討されている段階である。

本章では、現在進められている BA 活動における IFMIF/EVEDA 活動について、ポスト BA 活動である核融合原型炉用の先進核融合中性子源計画を中性子工学の観点から解説する。

5.1 IFMIF/EVEDA 原型加速器開発

図1に原型加速器である LIPAc の概要を示す。LIPAc は重水素イオン源 (入射器) - 高周波四重極加速器 (RFQ) - 中エネルギービーム輸送系 (MEBT) - 超伝導加速器 (SRF リニアック) - 診断系 (D-Plate) - 高エネルギービーム輸送系 (HEBT) - ビームダンプから構成された大電流重陽子線形加速器である。各機器は欧州の研究所から調達され、日本側は建屋建設、機器据付と調整ならびに制御システムの完成が担当である。LIPAc における最大

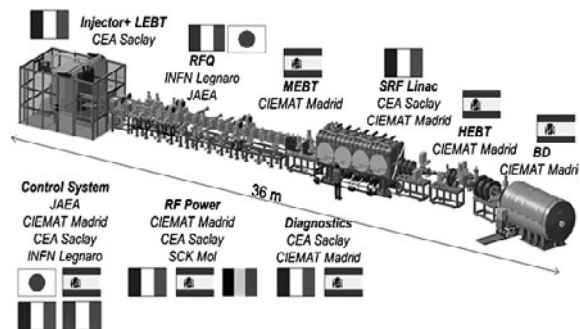


図1 IFMIF/EVEDA 原型加速器 LIPAc.

corresponding author's e-mail: ochiai.kentaro@jaea.go.jp

の開発課題は、9 MeV/125 mA/連続動作の重水素イオン（重陽子）ビームを発生させることである。入射器はフランス原子力・代替エネルギー庁サクレ研究所（CEA Saclay）が担当で、既に2012年に試運転で100 keV/140 mAの陽子及び重陽子イオンの連続ビームを実証済みである。この入射器は青森県六ヶ所村のサイトに2013年に移設され、現在原型加速器の初段として性能実証試験中である。また、RFQは2015年にイタリア国立核物理学研究所（INFN）レニャーロ研究所から、超伝導リニアックは2017年にフランス CEA-Saclay から、高周波システム、MEBT、HEBT、ビームダンプ等は2015年から2016年にかけてスペインエネルギー環境技術センター（CIEMAT）からそれぞれ搬入される予定であり、日本は主に建屋、周辺設備、高周波結合系、制御、全体組立・試験を担当している。現在までに重水素イオンによる入射器運転を実施し、RFQ増設に向けた設備調整が行われている段階である[4]。

## 5.2 リチウムターゲット試験開発

IFMIFのターゲットである液体リチウムターゲット（標的）に関しては実施機関として2010年度に世界最大の5000リットルの液体リチウム試験ループであるELTLを原子力機構大洗研究開発センター内に完成させ、工学検証試験活動（EVA：Engineering Validation Activities）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・健全運転を実証してきた。図2にELTLの概要を示す。全長約20 mの装置であり、最大毎秒3000リットルの液体金属リチウムを電磁ポンプで流し、最上部の密封容器内に設置したリチウムターゲットアッセンブリーまで運ばれ、再び

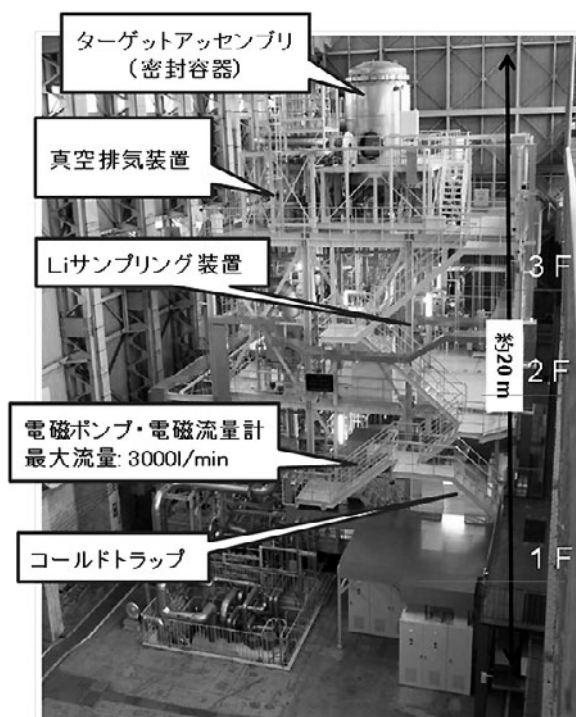


図2 IFMIF/EVEDA リチウムターゲットループ試験(ELTL)。

電磁ポンプに運ばれる。大学との共同研究で実施されたりチウム流動計測やリチウム純化の開発を進めながら、これまでに2014(平成26)年9月最長25日間の昼夜連続運転により長期間の流動安定性を実証し、真空中(373 Pa, 250°C)で厚さ25 mmのリチウム流を秒速20 mという高速で安定に生成することに成功している[5]。流動安定性確認のためレーザーを用いた計測法を導入し、液体リチウムターゲットの3次元形状を計測した。長期の運転において、定期的に計測を実施し、安定性能(IFMIFの要求値(波高の変動±1 mm以内))を実証した[6]。運転性能試験及び実証試験によりコールドトラップ制御温度200°Cの運転を実証(酸素濃度10 wppm以下に制御可能なことを実証)し、コールドトラップの純化試験も実施した。現在は機器のリチウム洗浄ならびに解体を実施し、主要機器の移設を検討している段階である。

## 5.3 今後の展開

### 5.3.1 先進核融合中性子源(A-FNS)計画

ポストBAの展開として、IFMIF/EVEDA活動を通して得た知見と資源を有効に活用し、施設の拡張を図りながら、重陽子ビームとリチウムターゲットによる先進中性子源を建設する計画が日欧で検討されている[7-9]。特に国内では原子力機構の六ヶ所サイトが中心となり、核融合原型炉初期運転までに必要な設計データを取得することを目的とした先進核融合中性子源照射施設(A-FNS:Advanced Fusion Neutron Source)の建設計画を進めており、国内核融合コミュニティ等と協議を重ねながら施設の仕様要求を検討している。これまでの意見から、計画の大きな役割は「EVEDA機器を用いた中性子源施設としての統合技術開発」と「原型炉初期運転までの機器・材料照射試験」の二つであり、それぞれを段階的に進めることが提案されている。前者の本質はメガワット級のイオンビームと液体金属ターゲットによる安定した中性子発生の検証であり、後者のそれは国内原型炉スケジュールに対応した材料照射データの取得である。

最近、核融合研究作業部会からの要請により、核融合炉原型炉開発のための技術基盤構築に関する検討が国内専門家によって行われ、2014年に報告書が部会に提出されている[10, 11]。その報告書によれば、国内核融合原型炉計画のマイルストーンとして、2027年に核融合原型炉開発の移行判断が設けられている。また移行判断までに中性子源による設計に必要な材料や機器照射のデータが必要であると報告されていることから、A-FNSの中性子運転を2025年頃には開始する必要がある、現行BA活動と並行して設計計画を進めねばならない状況である。

図3にA-FNSの概念図、および表1にA-FNSの物理パラメータの一例を示す[7]。IFMIFと同様、40 MeVの重水素イオンビームと液体リチウムターゲットによるd-Li核反応による中性子発生活法であるが、IFMIFが加速器2台の仕様に対して、A-FNSは加速器1台であり、重水素イオンビームの電流はCWで125 mAを想定している。また初段の加速器については、IFMIF/EVEDAのLIPAcの有効

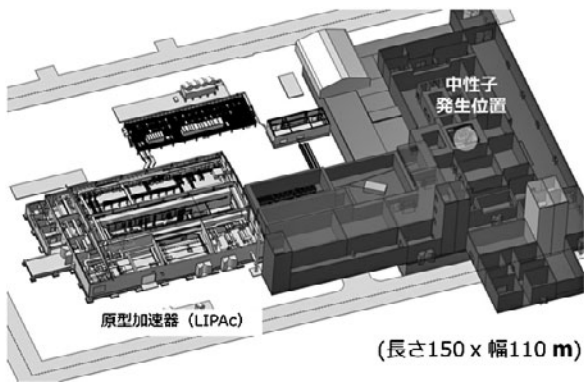


図3 次期核融合中性子源 A-FNS の概要。

表1 A-FNS の物理パラメータの一例。

リチウムバックプレート位置での平均値	
中性子発生率 n/s	$6.8 \times 10^{16}$
平均中性子束 n/cm <sup>2</sup> /s	$1.81 \times 10^{14}$
核発熱 W/g (Fe)	1.74
水素生成率 appm/fpy	$1.39 \times 10^3$
ヘリウム生成率 appm/fpy	$3.12 \times 10^2$
弾き出し (dpa) dpa/fpy	24.7
He/dpa	12.6

fpv: full power year  
1年間 125 mA での連続照射における値

利用を検討する。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平均フラックスで毎秒  $7 \times 10^{17}$  程度と予想される。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、DT 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、ELTL の技術開発をもとに考えれば、縦 5 cm、横 10 cm と IFMIF の半分となる可能性もあり、材料照射のシナリオとの整合性を取らなければならない。

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も必要との意見があり、IFMIF の中フラックスモジュール領域に相当する位置でのブランケット実験が重要であると考えられる。その他にも熱伝導率低下による原型炉ダイバータの冷却管候補材料の銅 (あるいは銅合金) の寿命が 1 dpa 程度と言われており、A-FNS による検証実験が必要であると考えられる。

2020年までに現行の BA 活動と並行して概念設計準備を始め、概念設計-工学設計と段階的に進め、2021年頃着工をめざし、2025-2028年までにビームオン試験を実施、最終的な中性子照射の定常運転をめざす。また本計画は現在の BA 活動枠外であるという認識のもと、新たな国際協定の下で進めることも視野に入れ、日欧間を中心に長期展望に立ったアクションプランの作成を進めているところである。

### 5.3.2 A-FNS の中性子工学研究

A-FNS で実施すべき中性子工学に関する研究開発について提案する。IFMIF は核融合炉材料照射を目的とした中

性子源であるため、ヘリウム生成量と弾き出し損傷量 (dpa) の比が DT 中性子照射と近い値になるように重水素イオンビームのエネルギーを 40 MeV に設定している。そのため中性子エネルギースペクトルは 14 MeV 付近のエネルギーにピークを持つ 60 MeV 近くまでの連続スペクトルである。IFMIF の核解析に必要な核データライブラリーとして、IAEA が整備している FENDL-3[11] が利用されている。これらの予測精度はサイクロトロン等の加速器実験によって検証はなされているものの、最終的な検証は A-FNS により行われるのが好ましい。その他、放射化反応断面積、水素やヘリウムガス生成断面積等のドシメトリーファイルの整備も同様である。これらの検証データは、A-FNS 以降に想定される IFMIF 建設の核設計予測精度をさらに向上させるために必要と考えられる。また遮蔽性能、停止後線量評価などの実験検証も同様に重要である。このような検証試験は A-FNS の中性子定常運転の前に実施するのが適切であると考えられるため、IFMIF 設計活動では中性子発生プロファイルに関する測定用モジュールが提案されているが、上記の検証に対応可能な測定モジュールを早急に検討するべきだと考えられる。

40 MeV 重水素イオンビームとリチウムとの核反応による中性子とガンマ線の発生率測定や発生分布のモニターの必要もあることから、大強度中性子場における中性子測定法の開発等も今後の課題となる。特に施設の運転管理上、ターゲット中のリチウムと重水素によるトリチウム生成率とベリリウム-7の検証は必要であり、十分な予測精度が要求されると考えられる。

重水素イオンビームの加速途中において、ビーム周辺にハローが生成するため RFQ のベーン等にビームに起因する高エネルギー重水素イオンが当たる可能性がある。またビームとダンプ材料との核反応によって、中性子・ガンマ線が放出されるとともにダンプ周辺の線量が増加する。このような線量評価は、作業従事者への被ばく低減を図る上で重要となるため、リチウムのみならず 40 MeV までの重水素イオンビームと構造材料とのドシメトリーファイルが必要になる。IAEA の FENDL-3 では、特に検証が必要な荷電粒子と候補材料中に関する核反応断面積が示されており、非常に参考となる。

最後に、核融合分野から外れるが多目的利用についても言及する。A-FNS のような大強度中性子源は核融合分野以外に利用可能である。特に昨今の医療用ラジオアイソトープ製造については安定な供給が望まれているにも関わらず世界的な照射用原子炉の高経年化や不測の輸送障害の教訓から、原子炉に代わる加速器型中性子源による医療用 RI 薬品 (主にテクネチウム-99) の国内安定供給が必要であるとの報告がある [12]。

A-FNS はそれらに大きく貢献できる可能性がある。核融合炉照射試験と並行し、 $^{100}\text{Mo}(n, 2n) ^{99}\text{Mo}$  反応を用いた、新しいテクネチウム-99製造の可能性もある。また 14 MeV 以上の高エネルギー中性子による  $^{67}\text{Zn}(n, p) ^{67}\text{Cu}$  反応を用いた、治療用 RI である銅-67製造が、核融合材料照射と同時に可能であると考えられる。核融合候補材料だ

けに限らず、応用研究に必要な核データの検証についても主体的に開発を進めることが重要であると考えられる。

#### 5.4 まとめ

現在のBA活動におけるIFMIF/EVEDAの現状について解説し、ポストBAにおける国内の原型炉設計用核融合中性子源(A-FNS)計画について説明した。さらにA-FNS計画においても中性子工学研究は重要であり、DT中性子源との違いを精査しながら、A-FNSでの照射計画を立案することが重要であると考えられる。A-FNS計画は非常に大きな施設規模となることが予想される。従来のIFMIFの計画である構造材料の照射だけでなく、ブランケットやダイバータ等の原型炉機器設計をより精度よくするために、A-FNSを利用することが重要であると考えられる。またA-FNS施設は原型炉設計以外にもITERのオペレーションや機器検証にも重要な知見を与えうる可能性がある。一方で、大強度中性子源であることから放射線や大量のリチウムを扱うため、安全に対する技術については慎重に進めていかねばならない。その建設期間はITERと原型炉設計のスケジュールを確認しながら、遅滞なくかつ確実に実施す

ることが要求される。A-FNSの関連施設として照射後試験施設やRI・トリチウム等を管理する施設も必要になってくるため、その予算規模を考慮すれば、医療・産業の応用研究等を積極的に取り入れるとともに、他の加速器中性子源コミュニティとの情報交換等を図りながら費用対効果の充実を図ることも計画を成立させる重要なポイントのひとつと考えられる。

#### 参考文献

- [1] 松井秀樹 他：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 1 (2006).
- [2] P. Garin and M. Sugimoto, *Fusion Eng. Des.* **84**, 259 (2009).
- [3] J. Knaster *et al.*, *Nucl. Fusion* **55**, 086003 (2015).
- [4] D. Gex *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **88**, 2497 (2013).
- [5] F.S. Nitti *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **100**, 425 (2015).
- [6] T. Kanemura *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **89**, 1642 (2014).
- [7] T. Nishitani *et al.*, *Fusion. Sci. Tech.* **68**, 326 (2015).
- [8] R. Heidinger *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **89**, 2136 (2014).
- [9] A. Ibarra *et al.*, *Fusion. Sci. Tech.* **66**, 252 (2014).
- [10] 合同コアチーム, NIFS-MEMO-69 (2014).
- [11] 合同コアチーム, NIFS-MEMO-72 (2015).
- [12] <https://www-nds.iaea.org/fendl3/vardocs.html>