特集

核融合研究開発の最近の状況

7 核融合中性子源計画

落合謙太郎[†]

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

核融合エネルギー研究開発部門

六ヶ所核融合研究所核融合炉材料研究開発部

039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駸字表館2-166

[†]ochiai.kentaro@qst.go.jp

核融合炉におけるブランケット構造材料の損傷に関する知見をより正確に評価し、供用期間中の健全性を確認するためには、ヘリウム生成率とはじき出し損傷率の比 (He/dpa) を10近くにし、はじき出しによって作られた欠陥とヘリウム生成との相互作用による材料変化を様々な材料試験によって検証することが必要であり、このために核融合炉を模擬した中性子スペクトルを持つ大強度中性子源が必須である。本章では、これまでのIFMIF/EVEDAでの開発技術をもとに、量研で計画している核融合中性子源施設建設に向けた活動計画を紹介するとともに、その幅広い利用計画に向けた提案を紹介する。

Key Words: high intensity neutron source, d-Li reaction, He production, irradiation defect, material irradiation, neutron application

1. 背景

核融合炉は重水素(D)と三重水素(T: トリチウム)との核融合反応により14.1 MeVのエネルギーを持った中性子(n)が核融合炉心周辺に配置するブランケット中の材料に衝突することで、熱エネルギーに変換され、この熱が発電に利用される。

この14 MeV中性子が材料に当たることによって材料は損傷を受け、その性質が変化(典型的には硬化し、延性、展性が減じる)するため、核融合中性子によるブランケット構造材料の候補である鉄鋼材料等の性質変化を正確に評価し、供用期間中に予想される電磁力も含めた負荷荷重等に対する健全性を検証することが必須である。

これまで、研究用原子炉による材料照射研究が進められてきており、多くの材料照射データが蓄積されている。しかし、核分裂原子炉の中

性はほとんどが熱中性子であり炉心近傍でも最大エネルギーは10 MeVにとどまる。図1は横軸に中性子による鉄の弾き出し損傷量(dpa: displacements per atom)を、縦軸に中性子と鉄との核反応によるヘリウム生成を核分裂原子炉と核融合炉、あるいは高エネルギー加速器によるスポレーション中性子源(図中のSNS/SINQ及びMTS)との比較を示している。核融合炉で最も中性子照射量を受ける材料はプラズマと直面する対向壁であり、日本が提案する対向壁候補材料は低放射化フェライト鋼F82H(鉄90 wt%, クロム8%, タングステン2%)である。F82HがDT中性子照射を受けた場合、ヘリウム生成率とはじき出し損傷率の比(He/dpa)が約10であるが、核分裂原子炉の場合は中性子のエネルギーが低いいため、ヘリウム生成がほとんど起こらず、He/dpaが非常に小さい。逆にスポレーション中性子源の場合は、エネルギー

図1 核融合炉ならびに中性子源による弾き出し損傷量とヘリウム生成量の相関 (Color online)

ピークは数MeVであっても、100MeV以上の中性子が存在するため、He/dpaが非常に大きな値となる。

核融合炉材料の材料損傷に関する知見をより正確に評価するためには、この比を10近くにし、中性子によるはじき出しによって作られた照射欠陥とヘリウム生成との相互作用による材料の性質の変化を様々な材料試験によって検証することが必要である。さらに核融合原型炉の設計でははじき出し損傷量が少なくとも20dpa (ヘリウム生成量で200appm以上) の照射データが必須である。

これまでのDT中性子源は加速器による重陽子 (D^+) ビームとチタンなどにトリチウム(T)を吸蔵させたターゲットを用いたDT中性子源であり、主に核データの検証等に利用されてきた。トリチウムを吸蔵した固体ターゲットではビーム電流が数十mAを超えると除熱が困難となり、チタン金属からトリチウムが抜け出てしまう。そのためDT中性子発生率は 10^{12} 個/sが限界であり、DT中性子源では数年間の連続照射を実施しても0.03dpaに満たず (図1の米国のDT中性子源RTNS-IIを参照)、材料照射の研究をすることは困難である。そこでHe/dpaが10程度ではじき出し損傷率を年間10dpa以上で

照射データを得るには大強度14MeV中性子源が必要となる。

そこで1970年代に高エネルギー重水素イオンビームと液体リチウムターゲットを用いたd-Li核反応による強力核融合中性子源 (以下、核融合中性子源) 施設の概念検討が核融合炉開発を行っていた主要各国で開始され、1990年代に国際核融合材料照射施設 (International Fusion Material Irradiation Facility, IFMIF) の概念設計活動が国際エネルギー機関 (IEA) の下で実施され、引き続き2007年より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 (Engineering Validation and Engineering Design Activities, EVEDA) 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本格的に実施している¹⁾。

これまでのIFMIF/EVEDAでの開発技術をもとに、日本の将来計画である核融合中性子源施設建設に向けた活動計画を紹介するとともに、その幅広い利用計画に向けた提案を紹介しよう。

2. IFMIF/EVEDAから核融合中性子源へ

BA活動の国内の実施機関である量子科学技術研究開発機構 (以下、QST、2016年3月までは日本原子力研究開発機構 (JAEA)) では、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 (Linear IFMIF Prototype Accelerator, LIPAc) の開発を進めている²⁾。またリチウムターゲットの開発については工学実証においてほぼ実機大の液体リチウムループ試験装置 (ELTL: EVEDA Lithium Test Loop) をJAEAの大洗研究開発センターに建設し、2014年までその工学実証試験を完了している³⁾。

現在のIFMIF/EVEDAについては2020年3月まで実施することが決定しているが、この後、

図2 A-FNSの概念図ならびに物理パラメータ (Color online)

2020年4月以降のIFMIF/EVEDAの展開については現在日欧で協議されており、主な活動のひとつとしてIFMIF/EVEDA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日欧共同の研究開発も検討されている。

またIFMIF/EVEDA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の建設計画が日欧それぞれで検討されている⁴⁻⁶⁾。国内ではQSTの六ヶ所サイトが中心となり、候補材料の健全性が見込まれる20 dpaまでの照射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⁷⁾。

図2にA-FNSの概念図ならびに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連続運転モードで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の有効利用も検討している。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で毎秒 7×10^{17} 程度と予想され、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。

現状、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の報告書^{8,9)}によれば、国内核融合炉整備計画のマイルストーンとして、2030年代に核融合炉開発の移行判断が設けられており、この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されている。このことから、A-FNSの中性子運転を2030年初頭には開始する必要がある、それに向けた設計計画を次のよ

うに立てている。

2020年代初期までには現行のBA活動と並行して、概念設計-基本設計と段階的に進め、2025年頃の実施設計・建設開始をめざし、2030年までには、リチウムターゲットに重陽子ビームを当てるビームオン試験を実施した後、最終的な中性子照射の定常運転を目指す。また本計画は、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事業計画等を進める必要がある。

3. 核融合中性子源の多目的利用

最後に、核融合研究開発分野外の多目的利用に関し、大強度中性子源施設のA-FNSを有効利用することについて述べる。

A-FNSは研究用原子炉も含む既存の中性子源と比較すると、中性子強度は照射研究用原子炉、国内では日本原子力研究開発機構の材料照射用原子炉JMTRに近い。違いは原子炉が10MeV以下の中性子源であることに對して、A-FNSは10MeV以上の中性子源である。したがって、A-FNSは高エネルギー大強度中性子源であることが大きな特徴であることから、これまでの原子炉中性子源の利用を包含し、かつこれまで製造が困難であったラジオアイソトープの製造に大きな威力を発揮することが期待される。

その一例として、医療用RI製造に大きく貢献できる可能性がある。具体的な例としては、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あるとの報告がある¹⁰⁾。A-FNSはそれらに大きく貢献できる可能性が十分にあり、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製造の可能性がある。また14MeV以上の高エネルギー中性子による $^{67}\text{Zn}(n, p)$

^{67}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。

この他、生物・農学に利用されるトレーサーRIの製造が可能であるとともに、高エネルギー中性子源の特徴を活かした、新規RI製造の研究開発が可能であると予想される。

このように核融合候補材料の照射試験だけに限らず、応用研究に必要なRI研究開発も進めることが可能となり、これらの技術開発はRIの安全取扱いや高放射線場での遠隔保守技術開発なども含め、核融合炉の安全設計とも深くリンクするものと考えられる。

4. まとめ

現在実施されているIFMIF/EVEDA以降の国内の先進核融合中性子源（A-FNS）計画について紹介した。非常に強い高速中性子源であるため核融合炉材料の照射試験を中心に、他分野の中性子利用研究を含めて広い分野での利用が期待できる。その建設期間はITERと原型炉建設に向けた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。今後、概念設計を進める上ではA-FNSの関連施設として照射後試験施設やRI・トリチウム等の取扱施設や、医療・産業の応用等の施設の概念を固めるために、核融合研究開発分野外への積極的な情報発信、情報交換を進めるとともに、他の加速器中性子源コミュニティとも効率的な利用検討等のための交流を図りながら計画を進めることが重要である。

文 献

- 1) Knaster, J., Ibarra, A., Abal, J., Abou-Sena, A., Arbeiter, F., Arranz, F., Arroyo, J. M., Bargallo, E., Beauvais, P.Y., Bernardi, D., Casal, N., Carmona, J. M., Chauvin, N., Comunian, M., Delferiere, O., Delgado, A., Diaz-Arocas, P., Fischer, U., Frisoni, M., Garcia, A., Garin, P., Gobin, R., Gouat, P., Groeschel, F., Heidinger, R., Ida, M., Kondo, K., Kikuchi, T., Kubo, T., Le Tonqueze, Y., Leysen, W., Mas, A.,

- Massaut, V., Matsumoto, H., Micciche, G., Mittwollen, M., Mora, J. C., Mota, F., Nghiem, P. A. P., Nititi, F., Nishiyama, K., Ogando, F., O'hira, S., Oliver, C., Orsini, F., Perez, D., Perez, M., Pinna, T., Pisent, A., Podadera, I., Porfiri, M., Pruneri, G., Queral, V., Rapisarda, D., Roman, R., Shingala, M., Soldaini, M., Sugimoto, M., Theile, J., Tian, K., Umeno, H., Uriot, D., Wakai, E., Watanabe, K., Weber, M., Yamamoto, M. and Yokomine, T., The accomplishment of the Engineering Design Activities of IFMIF/EVEDA: The European-Japanese project towards a Li(d, xn) fusion relevant neutron source, *Nucl. Fusion*, **55**, 086003 (2015)
- 2) Pruneri, G., Cara, P., Heidinger, R., Kasugai, A., Knaster, J., Ohira, S., Okumura, Y. and Sakamoto, K., Conventional facilities of the linear IFMIF prototype accelerator (LIPAc), *Fusion Eng. Des.*, **124**, 1101–1107 (2017)
- 3) Kondo, H., Kanemura, T., Furukawa, T., Hirakawa, Y., Wakai, E., Groeschel, F., Nitti, F. and Knaster, J., Validation of IFMIF liquid Li target for IFMIF/EVEDA project, *Fusion Eng. Des.*, **96–97**, 117–122 (2015)
- 4) Nishitani, T., Kondo, K., Ohira, S., Yamanishi, T., Sugimoto, M., Hayashi, T. and Ochiai, K., Neutron source for material and component tests by using IFMIF/EVEDA prototype accelerator, *Fus. Sci. Technol.*, **68**, 326–330 (2015)
- 5) Heidinger, R., Ibarra, A., Barabaschi, P., Cara, P., Mosnier, A., Mota, F. and Nitti, F. S., Technical analysis of an early fusion neutron source based on the enhancement of the IFMIF/EVEDA accelerator prototype, *Fusion Eng. Des.*, **89**, 2136–2140 (2014)
- 6) Ibarra, A., Heidinger, R., Barabaschi, P., Mota, F., Mosnier, A., Cara, P. and Nitti, F. S., A stepped approach from IFMIF/EVEDA toward IFMIF, *Fus. Sci. Technol.*, **66**, 252–259 (2014)

- 7) 落合謙太郎, ほか, 幅広いアプローチ (BA) 活動 IFMIF/EVEDA と今後の展開, *J. Plasma Fusion Res.*, **92**, 274–277 (2016)
- 8) 合同コアチーム, 核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告 (中間報告), NIFS-MEMO-69 (2014)
- 9) 合同コアチーム, 核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告 (最終報告), NIFS-MEMO-72 (2015)
- 10) 永井泰樹, 橋本和幸, 核医学診断・治療用 RI と新 RI 製造法, *Isotope News*, **719**, 7–13 (2014)

Abstract

Recent Status of Nuclear Fusion Research and Development

7 Advanced Neutron Source Project

Kentaro OCHIAI[†]: National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, 2–166 Omotedate, Obuchi, Rokkasho-mura, Aomori Pref. 039–3212, Japan, [†]ochiai.kentaro@qst.go.jp

For more accurately evaluation of the damage caused in the blanket structural materials in the nuclear fusion reactor and to verify their soundness during the service, under irradiation by the fusion neutron at a level that the ratio (He/dpa) of the helium production rate and displacement rate becomes close to 10, it is necessary to verify the material characteristics change due to the interaction between the defect created and the helium generation by various material tests. Therefore, verification using a high intensity neutron source with neutron spectrum simulating the fusion reactor like IFMIF is essential. In this chapter, based on the development technologies by IFMIF/EVEDA, a project for the construction of Advanced Fusion Neutron Source (AFNS) facility planned by QST with proposals for its usage for various purposes is introduced.