

小特集 最近の核融合中性子工学の進展

4. 核融合中性子源施設における中性子工学研究

4. Neutronics Research at Fusion Neutronics Facilities

西谷 健夫¹⁾, 今野 力²⁾, 佐藤 聡^{2)*}, 落合 謙太郎^{2)*}, 近藤 恵太郎^{2)*}, 村田 勲³⁾
 NISHITANI Takeo¹⁾, KONNO Chikara²⁾, SATO Satoshi^{2)*}, OCHIAI Kentaro^{2)*},
 KONDO Keitaro^{2)*} and MURATA Isao³⁾

¹⁾核融合科学研究所ヘリカル研究部高温プラズマ物理研究系, ^{2)*}日本原子力研究開発機構,

³⁾大阪大学大学院工学研究科

(原稿受付: 2015年12月21日)

日本では、これまで日本原子力研究開発機構（以後、原子力機構）の核融合中性子源 FNS、大阪大学強力 14 MeV 中性子工学実験装置、東北大学高速中性子実験室 FNL 等の中性子発生装置を中心として、核融合中性子工学の実験的研究が行われてきた。核融合中性子工学は、断面積を測定する微分実験、それらの断面積と計算手法の検証を目的とした積分実験と遮蔽実験、さらに増殖ブランケットの核特性試験というようにより現実的な応用の方へ進展してきた。本章ではこれらの概要を紹介する。

Keywords:

neutronics, FNS, OKTAVIAN, FNL, integral experiment, blanket experiment

4.1 はじめに

核融合中性子工学は、プラズマで発生する中性子に起因する、物理的・工学的な事象が全て対象であるが、主目的は遮蔽とブランケット核特性である。核融合中性子工学は、まず必要な断面積を測定する微分実験、その断面積と計算手法を検証する積分実験、積分実験に近いが遮蔽性能の検証を目的とした遮蔽実験、さらには、増殖ブランケットの模擬体形を用いた増殖ブランケット核特性試験と進展してきた。本章ではこれらの進展に沿って、核融合中性子工学の実験的研究の概要を紹介する。

4.2 微分実験

核データファイルは当初核分裂炉の核設計を目的に作成された。核分裂で発生する中性子の平均エネルギーは 2 MeV 程度であるが、10 MeV 以上までテールを引いており、かつ核融合反応そのものである D-T 反応または D-D 反応を利用した加速器中性子発生装置が比較的容易に利用できたことから、当初から核データファイルは 20 MeV 程度まで作成されており、核融合のエネルギー領域をカバーしていた。これは核融合にとって幸運であった。しかし、核融合では Li や Be など軽い核の核データが重要であり（増殖ブランケットにおいて Li はトリチウム増殖材、Be は中性子増倍材）、さらに $(n, 2n)$ 、 $(n, \alpha T)$ 反応など、反応の終状態が 3 体、4 体になるもの（ブレイクアップ反応と呼ばれる）が多い。このような反応で発生する中性子は入射エネルギーが単色でも連続スペクトルとなる。さらに軽い核の場合、中性子が核に入射した後、エネルギーが平衡

*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

状態になる複合核を形成する前に、中性子が放出され、入射中性子の運動量の“記憶”を多く残しているため、放出中性子の角度依存性が大きい。このような反応を取り扱うために、2重微分断面積（Double Differential Cross Section (DDX)）の考えが導入され、特に大阪大学 OKTAVIAN [1]と東北大学 FNL [2]で精力的に測定がなされた。通常の角度依存断面積 ($d\sigma/d\theta$) が微分断面積と呼ばれるのに対し、角度・エネルギー依存の 2階微分断面積で $d^2\sigma/d\theta dE$ と表されることから 2重微分断面積 (DDX) と呼ばれている。これらの成果は、精度の高い 2重微分断面積を取り入れた JENDL-Fusion File としてまとめられた。ちなみに 2002年に改訂された汎用核データファイルである JENDL-3.3では、JENDL-Fusion Fileの 2重微分断面積が取り入れられており、JENDLの改訂ごとに 2重微分断面積を有する核種が増えている。図 1に Beの 2重微分断面積の測定値と ENDF/B-VIと JENDL-Fusion Fileの評価値を示す。まだ一部で大きな差異があることがわかる。一方、原子力機構の核融合中性子源 FNS [3]では各種核融合材料の放射化断面積が精力的に測定された。

遮蔽のような中性子の輸送に関する課題では、反応後の中性子のエネルギーと角度が重要であるが、材料の照射損傷のような課題では、中性子入射によって生成される荷電粒子のエネルギーと角度も重要になる。つまり荷電粒子生成に関する 2重微分断面積である。しかし、中性子入射による荷電粒子生成 2重微分断面積は最も測定が難しい断面積のひとつであり、測定例は決して多くない。核融合分野では LLNL [4]、大阪大学 OKTAVIAN [5]、東北大学 FNL

corresponding author's e-mail: nishitani.takeo@nifs.ac.jp

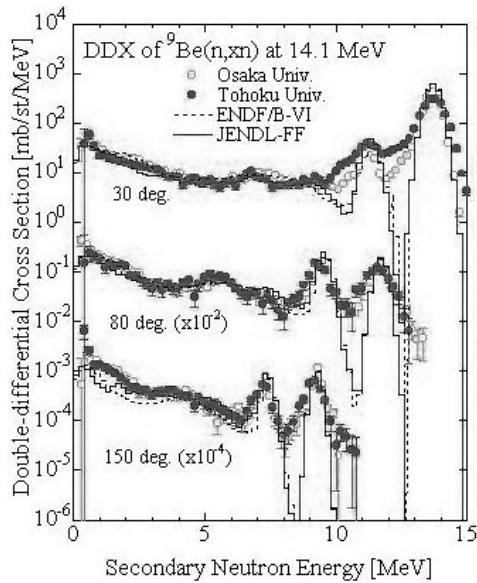


図1 14 MeV 中性子入射による Be の 2 重微分断面面積。

[6]で測定が試みられ、鉄などの中重核に関してはある程度データが蓄積された。一方、核融合炉材料として重要なベリリウム、リチウムなどの軽元素については、放出エネルギースペクトルや角度分布が複雑となり、従来の測定手法では十分な精度の測定データを取得することができず、発熱・損傷の評価に用いることができる実験データは皆無であった。このような状況を打開するため、2003年から大阪大学と原子力機構FNSの共同研究として、新しい測定手法の開発が進められた。この測定手法では、FNSで新しく利用可能となったビーム上のDT中性子源を利用することで、従来手法に比べて格段の低バックグラウンドを実現した。これによって半導体検出器の利用が可能になり、高いS/N比、良好なエネルギー分解能及び角度分解能、広い測定エネルギー範囲、粒子弁別能と現実的な測定時間(収量)が全て達成され、軽元素の荷電粒子生成2重微分断面面積の測定を高精度で行うことが可能になった[7]。現在までに世界で初めてベリリウム[8]、炭素[9]、フッ素[10]に対する系統的で詳細なデータの測定に成功している。また、リチウム7についても2013年度に測定を完了し、現在データの解析を行っているところである。

4.3 積分実験と遮蔽実験

2.2で述べた核データライブラリには、4.2の微分実験で得られた実験データや核反応理論計算をもとに、最も正しいと評価された中性子反応断面データが入っている。そのデータの精度は、主要反応については数%以下と高精度であることもあるが、起こりうる全ての核反応については、微分実験による実験データは不十分で、必ずしも精度が高いとは言えないのが現状である。

核融合炉では、プラズマで発生した中性子により、第1壁、ブランケット、真空容器、遮蔽体等の中で様々な核反応が多数起こる。そのため、核データに1%の誤差があり、1回の核反応で中性子束の計算値に1%の誤差しか入

らないとしても、様々な核反応が多数起こった後では、中性子束の計算値の誤差は数十%以上になる可能性がある。そこで、実際に比較的大きな実験体系にプラズマで発生する中性子と同じエネルギーの中性子を入射し、体系内での中性子束等を測定する実験を行い、その実験解析を計算上の近似がほとんどないモンテカルロコードを用いて行い、解析に用いた核データライブラリの精度を総合的に評価する実験が行われている。このような実験のうち、主に核データライブラリの精度検証に主眼を置いた実験を積分実験、遮蔽性能の実証、遮蔽計算精度検証に主眼を置いた実験を遮蔽実験と呼んでいる。このような積分実験、遮蔽実験を行うには、ある程度強度の高い中性子源が必要で、以前は大阪大学OKTAVIANでも精力的に行われていたが、現在では、原子力機構のFNS、イタリアのENEAのDT中性子源FNGでのみ実験が行われている。

積分実験では主に1元素(例えば、窒素、酸素、リチウム、ベリリウム、炭素、ケイ素、チタン、バナジウム、クロム、マンガン、鉄、銅、ニオブ、ジルコニウム、モリブデン、タングステン、鉛等)でできた比較的簡単な形状(例えば、球、円筒、直方体)の実験体系が用いられている。FNSでは擬似円筒あるいは直方体の実験体系内の中性子測定(中性子スペクトル測定、反応率測定)[11]及び体系からの角度依存漏洩中性子スペクトル測定(図2に測定配置を示す)[12]が、OKTAVIANでは球体系からの漏洩中性子スペクトル、ガンマ線スペクトル測定[13]が、FNGでは直方体の実験体系内の中性子測定(反応率測定)[14]が行われ、日本の核データライブラリJENDLをはじめ、核融合炉用核データライブラリFENDLの妥当性検証に用いられている[15-17]。このような実験結果の一例として、FNSで行った鉄体系内実験での体系内40cmでの中性子スペクトルの測定値と計算値との比較を図3に示す。日本の核データライブラリの最新版JENDL-4.0の一つ前の版JENDL-3.3を用いた計算値が10keV以下で実験値、最新版JENDL-4.0を用いた計算値よりも30%程度大きくなっていることがわかる。詳細解析の結果、この過大評価の原因が ^{57}Fe の10keV以下の非弾性散乱断面にあることが特定され、JENDL-4.0では ^{57}Fe の非弾性散乱断面は修正され、実験との一致が良くなった[15]。このように核データライブラリは必ずしも正しいわけではなく、微分実験、積分実験のデータをもとに地道に改良が加えられてきた。最近のFNSでの積分実験においても、銅、チタン、モリブデ

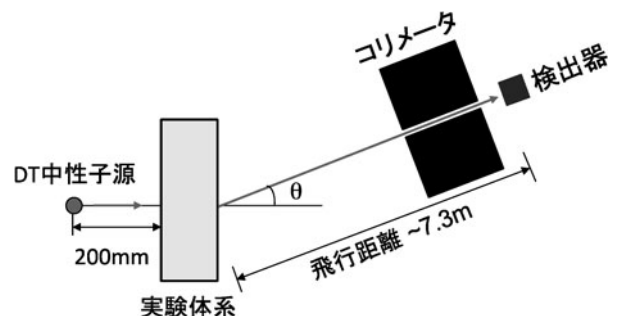


図2 FNSでの角度依存漏洩中性子スペクトル測定実験概略図。

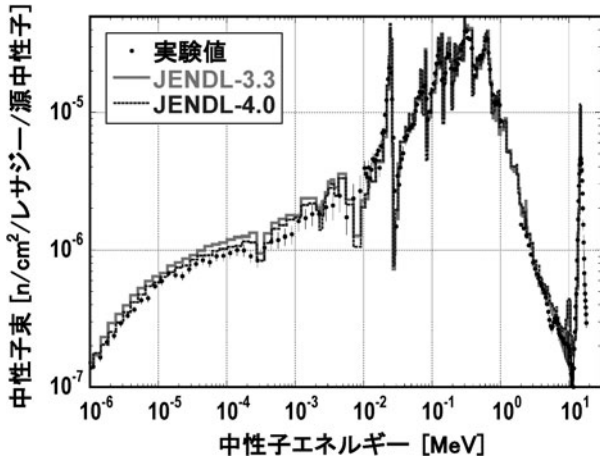


図3 FNSでの鉄体系内実験での31 cm位置での中性子スペクトル.

ン、鉛の核データに何らかの問題があることが指摘され [18], 研究が進められている.

核融合分野での遮蔽実験の代表的なものとして、ITERの工学設計活動の時に、超伝導コイルの発熱に対する核設計の精度検証のためにFNSとFNGで実施された核融合遮蔽実験がある [19, 20]. FNSで実施した316ステンレス鋼実験の体系図を図4に示す. この実験では、316ステンレス鋼でできたITERの遮蔽ブランケット、真空容器のDT中性子に対する遮蔽性能及び遮蔽計算精度が調べられた. 図5に316ステンレス鋼体系内91 cmの位置での中性子スペクトルの実験値と核融合炉用核データライブラリFENDL-2.1を用いた計算値をプロットした. 一般に、体系内の奥になればなるほど核データの誤差が積み重なって実験と計算の一致は悪くなるが、本実験では、体系内91 cmの位置でも計算と実験は30%以内で一致した. このような実験が何種類も行われ、最終的にITERの遮蔽計算の精度は40%程度と評価された.

4.4 ブランケット核特性実験

核融合炉全体で、1.0以上のトリチウム増殖比(TBR)を得ることが必要である. 原子力機構では、水冷却固体増殖材微小球(ペブル)充填型(WCSB)のブランケットを中心に開発を進めている. WCSB原型炉ブランケットは、構造材である低放射化フェライト鋼F82H、冷却水、トリチウム増殖材である直径1 mmのチタン酸リチウム(Li₂TiO₃)ペ

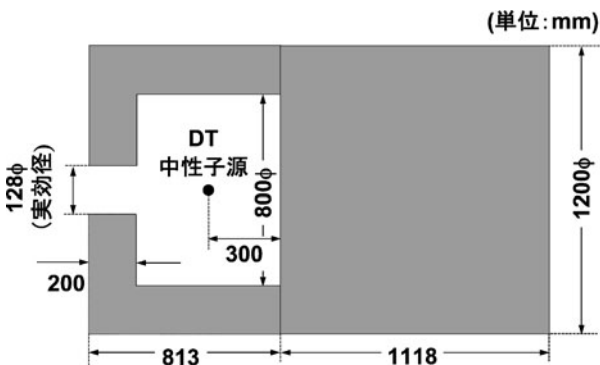


図4 FNSでの316ステンレス鋼実験体系概略図.

ブル或いは酸化リチウム(Li₂O)ペブル、中性子増倍材であるベリリウムペブルから構成されている. トリチウム増殖材ペブル充填層とベリリウムペブル充填層は交互に配置されている. ベリリウムにより中性子を増大させ、増大した中性子をトリチウム増殖材に効率良く吸収させることにより、TBRが増加するように設計を進めている. トリチウム増殖材ペブル充填層とベリリウムペブル充填層間には、除熱のため、F82H製の冷却水配管が設置される. F82Hや冷却水によって、中性子は散乱、吸収され、TBRは減少する. WCSB原型炉ブランケットでは、核融合炉全体の正味TBRは1~1.2であり、設計裕度は小さく、非常に高い設計計算精度が必要である. 原子力機構では、トリチウム生成率(TPR)評価を主目的として、DT中性子を用いた様々な中性子工学実験がFNSを用いて行われてきた. 本章では、多層構造モックアップ核特性実験に関して紹介する. 図6に多層構造ブランケット核特性実験の実験体系を示す. F82Hと水から構成される第一壁パネル(厚さ16 mm)と隔壁パネル(厚さ7.8 mm)4層、⁶Liの濃縮度が40%のチタン酸リチウムブロック(厚さ12 mm)2層、ベリリウムブロック(厚さ101.6 mm)2層から成る多層構造モックアップを用いて、DT中性子照射核特性実験が行われた. 体系全体の幅及び高さは450 mmである. TPR検出器とし

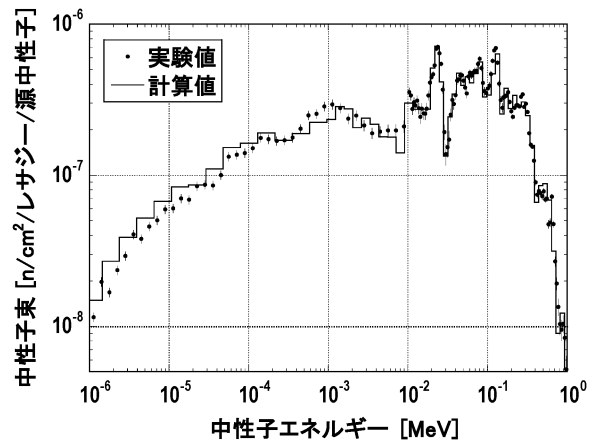


図5 FNSでの316ステンレス鋼体系内91 cm位置での中性子スペクトル.

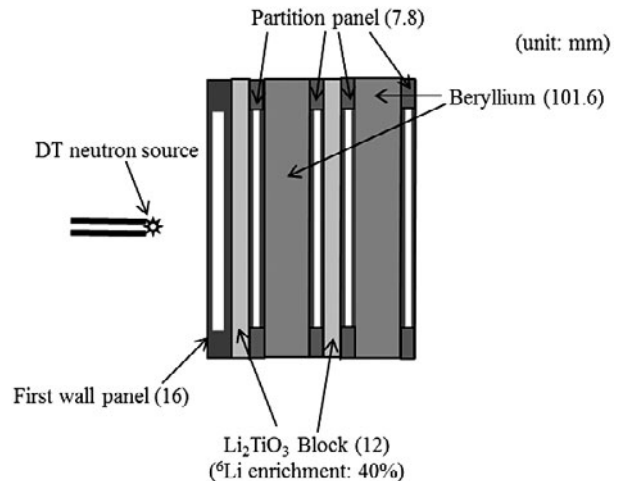


図6 多層構造ブランケット核特性実験の実験体系.

て厚さ 0.5 mm~2 mm の炭酸リチウムペレットをチタン酸リチウムブロックの中心に設置し、照射後ペレット中に生成されたトリチウムからのベータ線スペクトルを液体シンチレーションカウンターで計数することにより、実験誤差 7% で TPR が計測された。図 7 に TPR の計算値と実験値の比 (C/E) を示す。計算は MCNP5-1.40 及び最新の核データライブラリ JENDL-4.0 を用いて行われた。積算トリチウム生成量の C/E は、第 1 層では 0.99, 第 2 層では 1.03 であり、計算結果は実験誤差の範囲内で実験結果と一致しており、最新のモンテカルロ計算コード及び核データにより実験結果をほぼ正しく再現できている [21]。

FNS では、ブラケット核特性実験をさらに進展させ、模擬ブラケット内に実際のブラケットの増殖材領域を模擬したキャプセルを設置し、実際にスイープガスを流して、オンラインでトリチウムを回収し、トリチウム回収率の温度依存性や増殖材ペルの粒径依存性等を総合的に評価する実験を 2008 年から世界に先駆けて行っている [22]。

図 8 に FNS におけるトリチウム回収トリチウム実験のブロック図を示す。DT 中性子源 FNS から約 20 cm 離れた位置にブラケット模擬体系のベリリウム表面になるよう体系を設置し、DT 中性子発生率を毎秒 10^{11} で一定に 5 時間照射した。照射キャプセル中の増殖材充填周辺に取り付けたヒーターを用いて、核融合炉で想定される 800℃ までチタン酸リチウムを加熱し、温度によるトリチウム回収の違いを調べた。

トリチウムを回収するスイープガスはヘリウムガス中に 1% 水素ガス (H_2) を添加している。また酸化銅触媒を用いて、回収トリチウムの化学形をトリチウム水 (HTO) とトリチウムガス (HT) に分けて測定も実施した。図 9 に示すように、リチウム生成量はモンテカルロシミュレーションコード MCNP によって DT 中性子発生量当り 0.89×10^{-12} Bq となり、すべての温度で解析値の測定誤差範囲内に収まっていることから、ブラケットで想定される温度範囲でのトリチウムの全回収の見通しが得られている。

またこの実験から、核融合炉の燃料処理系の設計に必要な増殖材温度に対する、回収されたトリチウムの化学形変化の定量測定に成功し、増殖材の温度が 600℃ 以上の場合、そのほとんどがトリチウムガスとして回収されることを明らかにした。現在、FNS におけるトリチウム回収実験は ITER のテストブラケットモジュール (TBM) あるいは原型炉でも検討される回収トリチウム測定法の有力な方法として検討されている、電離箱によるトリチウム測定法の検証を進めている。

4.5 まとめ

日本における核融合中性子工学の実験的研究では、断面積の測定に始まり、単純な実験体系を用いた積分実験・遮蔽実験を経て、模擬ブラケットを用いたトリチウム回収実験を行うまでに発展してきた。測定または確認してきた断面積は JENDL を介して、核融合の世界標準の核データ

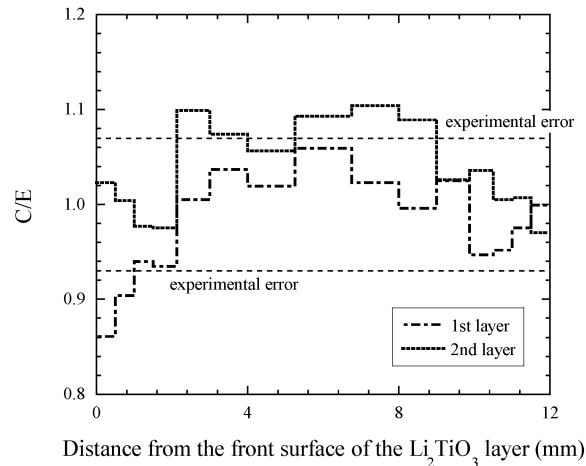


図 7 多層構造ブラケット核特性実験での TPR の計算結果と実験結果の比。

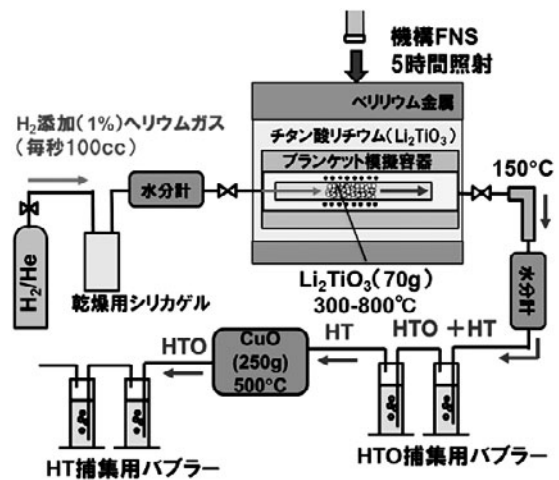


図 8 FNS におけるトリチウム回収トリチウム実験のブロック図。

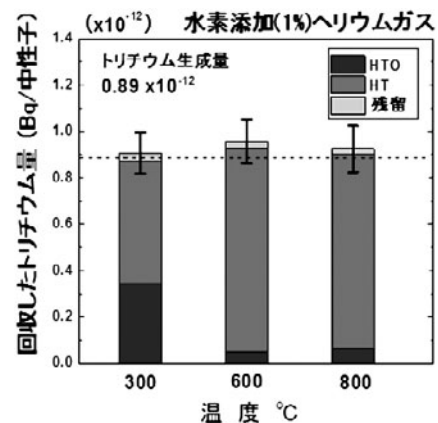


図 9 ペブル試料の温度に対するトリチウム回収率の測定結果。

ライブラリである FENDL にも数多く採用されている。これらの研究は、大阪大学 OKTAVIAN, 東北大学 FNL 及び原子力機構の FNS で牽引してきたと言っても過言ではない。特に 2000 年以降は大学の装置はイオンビーム応用等に軸足を移し、事実上 FNS が国内唯一の装置であり、積分実験やトリチウム回収実験など先駆的な研究で成果を上げてきた。まだやるべき課題が多いことが各節で指摘されているが、その FNS も 2016 年 3 月で運転を停止するとのことで

あり、今後日本において核融合中性子工学の実験的研究が停滞、消滅することが強く懸念される。

参考文献

- [1] A. Takahashi *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **25**, 215 (1988).
- [2] M. Baba *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **376**, 115 (1996).
- [3] Y. Ikeda *et al.*, JAERI 1312 (1988). C. Konno *et al.*, JAERI 1329 (1993).
- [4] K.R. Alvar *et al.*, Nucl. Instrum. Methods **148**, 303 (1978).
- [5] Ko Ko Oo *et al.*, Nucl. Sci. Eng. **132**, 16 (1999).
- [6] N. Ito *et al.*, Nucl. Instrum. Method A **337**, 474 (1994).
- [7] K. Kondo *et al.*, Nucl. Instrum. Method A **568**, 723 (2006).
- [8] K. Kondo *et al.*, *Proc. Int. Conf. Nucl. Data for Sci. Technol.* (ND 2007), Vol.1, 407 (2008).
- [9] K. Kondo *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **45**, 103 (2008).
- [10] K. Kondo *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **48**, 1146 (2011).
- [11] F. Maekawa *et al.*, JAERI-Data/Code 98-021 (1998).
- [12] Y. Oyama *et al.*, JAERI-M 90-092 (1990).
- [13] F. Maekawa *et al.*, JAERI-M 94-014 (1994).
- [14] P. Batistoni *et al.*, J. Nucl. Mater. **329-333**, Part A 683 (2004).
- [15] C. Konno *et al.*, Fusion Eng. Des. **86**, 2682 (2011).
- [16] C. Konno *et al.*, Prog. Nucl. Sci. Technol. **2**, 346 (2011).
- [17] U. Fischer *et al.*, INDC (NDS)-0631 (2014).
- [18] M. Ohta *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 2164 (2014).
- [19] F. Maekawa *et al.*, Fusion Technol. **30**, 1081 (1996).
- [20] P. Batistoni *et al.*, Fusion Eng. Des. **47**, 25-60 (1999).
- [21] 佐藤 聡他：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 306 (2006).
- [22] K. Ochiai *et al.*, Fusion Eng. Des. **98-99**, 1843 (2015).