JAEA-Technology 2007-067



核熱解析による固体増殖水冷却方式 テストブランケットモジュールの トリチウム増殖比に関する検討

Studies on Tritium Breeding Ratio for Solid Breeder Blanket Cooled by Pressurized Water through Nuclear and Thermal Analyses

関 洋治 谷川 尚 鶴 大悟 榎枝 幹男秋場 真人 江里 幸一郎 丹澤 貞光 西 宏廣瀬 貴規 本間 隆 毛利 憲介 横山 堅二

Yohji SEKI, Hisashi TANIGAWA, Daigo TSURU, Mikio ENOEDA Masato AKIBA, Koichiro EZATO, Sadamitsu TANZAWA, Hiroshi NISHI Takanori HIROSE, Takashi HONMA, Kensuke MOHRI and Kenji YOKOYAMA

> 核融合研究開発部門 ブランケット 工学研究グループ

Blanket Technology Group Fusion Research and Development Directorate

January 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp/index.shtml</u>) より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

核熱解析による固体増殖水冷却方式テストブランケットモジュール のトリチウム増殖比に関する検討

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 核融合エネルギー工学研究開発ユニット

関 洋治^{*1}、谷川 尚、鶴 大悟、榎枝 幹男、秋場 真人、江里 幸一郎、 丹澤 貞光、西 宏、廣瀬 貴規、本間 隆、毛利 憲介^{*2}、横山 堅二

(2007年11月15日 受理)

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)は、原子力委員会核融合会議が平成 12 年 8 月に策定した「核融合炉ブランケットの研究開発の進め方」に基づき、固体増殖水冷却方式の ブランケットについて、中核的な機関として研究開発を進めている。本報告は、原子力機構が 研究開発および設計を進め、ITER での試験を予定しているテストブランケットモジュール (Test Blanket Module, TBM)について、トリチウム増殖比(Tritium Breeding Ratio, TBR)と増 殖材、増倍材充填層の内部温度に注目しつつ、充填層の厚さと組み合わせを最適化するために 実施した一次元核熱計算の成果をまとめたものである。

今回検討を行った固体増殖材を用いた加圧水冷却方式のブランケットでは、モジュール箱構 造体の内部にトリチウム増殖材(Li₂TiO₃)、中性子増倍材(Be)の微小球が層状に充填され、 生成されたトリチウムは1気圧程度のヘリウムスイープガスによって回収される。中性子負荷 および熱負荷は ITER 条件、TBM の構造寸法は現行設計に基づいている。増殖材、増倍材の 健全性が維持される最高温度以下で TBR の増加を目指し、増殖、増倍材の層の厚さを最適化 した。本研究によって得られた代表的な知見を以下に示す。

- 充填層の多層構造においても、体積比 R=V(Be)/V(Li₂TiO₃) = 4~5 に TBR の最大値が存在 することが、明らかになった。
- (2) 増殖材層の背面に Single Packing の増倍材層を 2 層配置することによって、TBR のピー ク付近である R=4~5 が可能であることがわかった。さらに、材料の健全性が維持される 最高温度(Li₂TiO₃: 900℃, Be: 600℃)で Single Packing の増倍材、増殖材層を交互に 配置した場合の TBR と比較すると、最適化された層構造の TBR では、6Li 濃縮度 7.5%(天 然), 40%, 90%に対して、約 2.0%, 3.2%, 4.4%それぞれ増加させることに成功した。

本研究成果は、増殖材の⁶Li濃縮度、増倍材の充填率、増殖材・増倍材充填層の厚さに対して、 TBR を系統的にまとめたことにある。これらの結果は、充填層の厚さや濃縮度等を評価、検討、 決定する上で、設計段階の TBR の見積もりに貢献する一つのデータベースであり、原型炉を 見据えた TBM 設計の研究開発に資するものである。

Studies on Tritium Breeding Ratio for Solid Breeder Blanket Cooled by Pressurized Water through Nuclear and Thermal Analyses

Yohji SEKI^{**1}, Hisashi TANIGAWA, Daigo TSURU, Mikio ENOEDA, Masato AKIBA, Koichiro EZATO, Sadamitsu TANZAWA, Hiroshi NISHI, Takanori HIROSE, Takashi HONMA, Kensuke MOHRI^{**2} and Kenji YOKOYAMA

Fusion Research and Development Directorate, Division of Fusion Energy Technology, Japan Atomic Energy Agency Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received November 15, 2007)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been performing the research, development and design of blankets with water-cooled solid breeder for fusion power plant as a leading institute in Japan, according to the long-term R&D program established by the Fusion Council in 1999. For our design, pebbles of a ceramic tritium breeder (Li_2TiO_3) and a beryllium neutron multiplier (Be) are packed in the constitutive layer structures of a test blanket module (TBM) for ITER. These reports are results of one-dimensional nuclear and thermal analyses on the TBM emphasizing on optimized configuration of the breeder and multiplier layers. Taking into account increment of TBR, the radial widths of the breeder and multiplier layers are optimized. The main results of our study are as follows:

- (1) In multilayered structures of pebble beds, existence of the peak of the TBR was revealed within the range of the volume ratio $R = V(Be) / V(Li_2TiO_3) = 4 5$.
- (2) In the case of optimized layer structure for the single packing, a layer of Be was set to be the two layers behind a layer of Li₂TiO₃. The R became available for staying in the range of R = 4 5. Consequently, the TBR respectively increased by 2.0%, 3.2% and 4.0% with 7.5%(nature), 40% and 90% of enrichment of ⁶Li compared to TBR of TBM in which the layers of Be and Li₂TiO₃ were interlaminated.

This database of TBR for optimized layer structure contributes to the estimation of TBR at the design stage of the TBM and demonstration blanket aimed to strengthen the commercial competitiveness and technical feasibility.

Keywords: Solid Breeder Blanket, Tritium Product, ITER TBM, TBR, Pebble Bed

[※]1 Post-Doctoral Fellow

^{*2} Collaborating Engineer

目 次

1.	序論		1
2.	テス	トブランケット・モジュールにおける充填層の概要	1
4	2.1 角	¥析対象および TBM 構造材と増殖材・増倍材	2
	2.1.1	トリチウム増殖材	2
	2.1.2	2 中性子増倍材	3
3.	核熱	解析の解析条件と結果	3
į	3.1 垟	¹ 殖材、増倍材層の幅に対する TBR と充填層内最高温度の変化	3
	3.1.1	第1層増殖材、第2層増倍材の幅をそれぞれ増減させた場合	3
	3.1.2	2 第1層増殖材、第2層増倍材、第3層増殖材で増倍材層の幅を増減させた場合	4
é	3.2 刃	記行の設計概念におけるテストブランケット・モジュールの TBR	5
e e	3.3 埠	[}] 19 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	6
ę	3.4 T	BR の変化の傾向に基づいた増殖材、増倍材層の配置の最適化	7
4.	結論		8
謝	锌		1
参	考文献	1	1
付给	禄 1	現行設計概念における TBM の温度分布2	24
付約	禄 2	現行設計概念における TBM の増殖材層における ⁶ Li 燃焼度の評価 2	26
付約	禄 3	第1層目に増倍材層を配置した場合の TBR 2	28

Contents

1.	In	trod	uction	1
2.	Сс	once	pt of Pebble Beds for Test Blanket Module	1
2	2.1	Str	ucture and Computational Configuration of TBM with Solid Breeder	
		an	d Neutron Multiplier Pebble Beds	2
	2.	1.1	Solid Breeder Pebble	2
	2.	1.2	Neutron Multiplier Pebble	3
3.	Сс	ondit	ions, Results and discussion of Thermal Nuclear Analyses	3
ĉ	3.1	Eff	ect of Layer Width of Solid Breeder and Neutron Multiplier Pebble Beds	
		on	TBR and Max Temperature in Pebble Beds	3
	3.	1.1	Increasing 1st Layer Width of Solid Breeder Pebble Bed and 2nd Layer Width	of
			Neutron Multiplier one	3
	3.	1.2	Increasing 2nd Layer Width of Neutron Multiplier Pebble Bed	
			between 1st and 3rd Layers of Solid Breeder one	4
ŝ	3.2	ΤВ	R in TBM on the Basis of Current Design Concept	5
ę	3.3	Eff	ect of Relocated Layer of Solid Breeder and Neutron Multiplier	
		Pe	bble Beds on TBR	6
Ċ	8.4	Mo	dified Layer Layout of Solid Breeder and Neutron Multiplier Pebble Beds on th	ıe
		Ba	sis of Database of TBR	7
4.	Co	onclu	ding Remarks	8
Ac	kno	wlee	lgements	11
Re	fere	ences	3	11
Ap	pen	ndix	1 Temperature Profile in TBM on the Basis of Current Design Concept 2	24
Ap	pen	ndix	2 Burn-up of ⁶ Li in TBM on the Basis of Current Design Concept	26
Ap	pen	ndix	3 TBR in the Case of 1st Layer of Neutron Multiplier Pebble Bed	28

1. 序論

ITER の主要目的の一つに、核融合原型炉用増殖ブランケット開発に向けたテストブランケ ット・モジュール(Test Blanket Module, TBM)の工学試験がある。ITER は、実際の核融合 環境下で、原型炉用増殖ブランケットシステムの総合性能試験ができる初めての装置となる。 そのため、ITER を用いた TBM 工学試験は、核融合による発電を実証する原型炉開発のため の重要な中間ステップと位置付けられ、ITER 計画と整合をとりつつ、遅延無く原型炉ブラン ケットと基本的に同じ設計概念の TBM を開発することが重要である。

TBM 設計構想の基となる核融合原型炉において、燃料の自給を図るには、核融合反応での 消費に見合うトリチウム(T)を生産しなければならない。核融合原型炉の燃料である重水素は海 水からほぼ無尽蔵に得ることが可能である。一方、トリチウムは天然の存在率が非常に低い。 そのため、核融合炉では、ブランケットの中に固体または液体のリチウム(Li)化合物を充填し て、中性子(n)と Li の核反応⁶Li(n,α)T,⁷Li(n,n',α)T を利用し、トリチウム生産を行う。 核融合炉を実用化するためには、トリチウムの生産率と消費率の比であるトリチウム増殖比

(Tritium Breeding Ratio, TBR)が 1.0 以上でなければならない。さらに、材料への吸着・溶解、放射性崩壊分の補充、貯蔵用・後続炉へのトリチウム確保などの観点から、TBR は 1.05以上が必要とされている。従って、原型炉につながる TBM を考える場合、TBR の十分な見積もり、評価が重要である。また、Li 化合物の増殖材部は、高発熱領域となるため、材料の健全性が維持される温度での設計が要求される。従って、TBM の設計では、温度分布と発熱分布の見積もりも重要となる。

本研究では、日本原子力研究開発機構(原子力機構)が進めている TBM の設計の一環とし て、ANIHEAT を用いて、一次元核熱解析を実施した。ANIHEAT は、1 次元 SN コード ANISN 及び JENDL-3.1¹⁾を基とした群定数ライブラリーFUSION-40²⁾を連成させ核解析を行い、得ら れた中性子及びガンマ線スペクトルから APPLE-3³⁾を介して、核発熱率 ⁴⁾や TBR 等の物理量 を得るための連成ソルバーである。充填体は、ベリリウム(Be)を中性子増倍材として、リチ ウムセラミックス(Li₂TiO₃)をトリチウム増殖材として用いた。中性子増倍材の充填法は、平 均直径 2[mm]の微小球のみを充填する Single Packing と、平均直径 0.2[mm]と 2[mm]の微小 球を混合して充填する Binary Packing を仮定した。また、6Li の濃縮度は、7.5% (天然)、40%、 90%の場合を考慮して、TBR の比較・評価を行った。

本研究成果は、増殖材の⁶Li濃縮度、増倍材の充填率、増殖材・増倍材充填層の厚さに対する TBR の変化の傾向を把握することにより、核融合炉による発電を実証する原型炉を見据えた TBM の設計および研究開発に資するものである。

2. テストブランケット・モジュールにおける充填層の概要

原子力機構が設計を進めている TBM の概略図を Fig. 2-1(a)に示す。TBM では、燃料増殖機能の実証のためにブランケット構造体の内部にトリチウム増殖材と中性子増倍材が収められている。固体増殖方式 TBM では、水冷却、ヘリウムガス冷却に関わらず微小球(ペブル)状の

増殖材・増倍材を使用する方針となっている。このようなペブル形状は、核融合炉の運転の進行 にともない生成されるヘリウムを、増殖・増倍材料の外へ容易に放出する特徴を有する。ヘリウ ム生成によって生じる体積膨張を緩和することが可能であるため、材料の熱伝導率や強度の低 下を抑制し、ブランケット容器の破損を防ぐことが期待される。また、生成されたトリチウム の回収が、ペブル同士の空隙にスイープガス(ヘリウム)を流通させることによって可能とな る。一方、ペブル状の材料では、構造設計において重要な熱的・機械的な性質がバルク材と異な る点に注意が必要となる。また、増殖材層と増倍材層の組み合わせにより、TBRと発熱分布が 変化する。そのため、効果的な TBR 獲得と増殖材・増倍材の使用限界温度を満たすような、充 填層構造の最適化が求められる。

2.1 解析対象および TBM 構造材と増殖材・増倍材

TBM は、Fig. 2-1(b)で示すように 2 つのサブ・モジュールで構成される。プラズマ側から第 1 壁(First Wall: FW)、増殖材・増倍材の充填層、バック・プレート(Back Plate: BP)の構成を とる。高温高圧水による除熱は、FW と側壁に内蔵される矩形管、充填層の隔壁となるメンブ レンパネル(Membrane Panel: MP)と BP に内蔵される円管により行われる。TBM の主要設計 条件を Table 2-1 に示す。TBM 構造材には、現時点で最有力候補となっている低放射化フェラ イト鋼(F82H)を用い、FW 表面には、アーマー材として Be を設定した。

サブ・モジュール単体の概略図と本研究の解析対象を、Fig. 2-2(a)と(b)にそれぞれ示す。直方 体形状の TBM を対象としているため、直交座標系で解析を行った。矩形管と円管は、一次元 解析のため平行平板で模擬した。平行平板のプラズマ半径方向幅は、各層における矩形管と円 管の冷却水断面積の総和と一致するように定めた。

本解析で用いた TBM を構成する各層の例として、6Li 濃縮度 7.5%(天然)、Be Binary Packing における各層の幅、配置、メッシュ数を Table 2-2 に示す。総充填層幅は、47.5[cm]であり、 増殖材層と増倍材層の間には必ず MP を設置した。増倍材層を 2 層連続で配置する場合には、 MP ではなく冷却管のみ設置することとし、解析対象には、冷却管のみを反映させた。中性子 境界条件として、TBM に相対する遮蔽ブランケットを反射体と仮定し、プラズマ側へ放出さ れる中性子は反射条件とした。また、解析対象の最背面は真空条件とした。熱的境界条件とし て、FW に 0.25[MW/m²]の一様熱流束加熱条件を課し、最背面を断熱条件とした。

2.1.1 トリチウム増殖材

トリチウム増殖材の仕様を Table 2-3 に示す。トリチウム増殖材は、焼結密度 81%の Li₂TiO₃ を採用し、充填率を 63%、荷重による歪みなしと仮定した。使用限界温度を 900[℃]とした。 Li₂TiO₃の有効熱伝導率を Fig. 2-3 に示す。今回適用した有効熱伝導率は、Tanigawa ら⁵⁾の実 験で得られた近似曲線を適用した。現在設計されている TBM の充填層は無荷重のため、本解 析においても、荷重を負荷していない有効熱伝導率の経験則分布 5)を用いた。Li₂TiO₃に含まれ る ⁶Li の濃縮度が及ぼす TBR への影響を評価するために、濃縮度は、7.5%(天然), 40%, 90%の 3 ケースで解析を実施した。 2.1.2 中性子增倍材

中性子増倍材の仕様を Table 2-4 に示す。中性子増倍材は、焼結密度 100%の Be を採用し、 Single Packing で充填率を 62%、Binary Packing で充填率を 83%、荷重による歪みなしと仮 定した。使用限界温度を 600[℃]とした。Be の有効熱伝導率を Fig. 2-3 に示す。実効熱伝導率 は、Single Packing での実験 ⁶⁾と Binary Packing での実験 ⁷⁾で得られた経験式をそれぞれ適 用した。

 Single packing において、Reimann らが行った実験条件と経験式⁶は以下のとおりである。

 実験条件:定常法、直径 1.0[mm]、雰囲気 He(0.1[MPa])、充填率 63.5%。

 K = 1.81 + 0.0012×T - 5×10⁻⁷×T²

Binary packing において Dalle Donne らが行った実験条件と経験式⁷⁾ は以下のとおりである。

実験条件:定常法、直径 2.0 - 0.2[mm]、雰囲気 He(0.1[MPa])、充填率 80.8%。

 $K = 7.31 + 1.01 \times 10^{-4} \times T$

ここで、K [W/mK]は有効熱伝導率、T[℃]はペブル充填体の平均温度である。

3. 核熱解析の解析条件と結果

(2)

本研究の目的は、増殖材、増倍材層の層幅と配置の変更による TBR の変化の傾向を捉え、 最適化された層構造を構築することにある。解析方針の相関図を Fig. 3-1 に示す。はじめに、 単純化した 2 層および 3 層構造に対して層幅を変化させた解析を行い TBR の変化の傾向を理 解する。次に、現在、TBM の設計概念で採用さえている増殖・増倍材を交互に充填する層構造 の解析を行い、上記の傾向と比較し、現状を把握する。さらに、多層構造の幅と配置を変更し た解析を実施し、TBR の変化の傾向を理解する。最後に、TBR の変化の傾向に基づいた増殖 材、増倍材層の配置変更を行い、現行設計概念における TBM の解析結果と比較、検討を行う。

3.1 増殖材、増倍材層の幅に対する TBR と充填層内最高温度の変化

層状構造を持つ固体増殖ブランケットでは、限られた総充填幅において、プラズマから発生 する中性子を効率良く利用し、適切な TBR の確保を行う必要がある。そこで、層の配置を変 更する前段階として、充填体の温度や総充填幅に制限を設けず、単純化された層構造において 解析を行う。これにより、増殖材、増倍材層の幅を変化させた場合の TBR と最高温度の変化 の傾向を把握する。

3.1.1 第1層増殖材、第2層増倍材の幅をそれぞれ増減させた場合

(1) 解析条件

第1層目に⁶Li 濃縮度 40%の増殖材、第2層目に Single Packing の増倍材を充填し、単純な2層構造の解析を行う。増殖材層、増倍材層の幅を個別に増減させて、TBR と最高温度の変化の傾向を調べることを目的とする。ここで、MP を含む増殖材と増倍材を充填する幅の総和

の上限は、設けていない。また、増倍材と増殖材の体積比を $R = V_{Be} / V_{Li_2TiO_3}$ とした。増殖材層 と増倍材層の基準となる幅は、各層の最高温度が 900[°C](Li₂TiO₃), 600[°C] (Be)となる幅に設 定した。基準幅による単位高さ、単位幅当たりの体積を $V'_{Li_2TiO_3}$, V'_{Be} とし、基準となる体積比 を $R' = V'_{Be} / V'_{Li_1TiO_3}$ とした。増殖材層の幅を固定した場合は、増倍材層幅の増減を体積比R/R'で

表し、増倍材層の幅を固定した場合は、増殖材層幅の増減を体積比 R'/R で表す。

(2) 解析結果

体積比に対する TBR の分布を Fig. 3-2 に示す。基準体積(図中 A 点)から増倍材層の体積が 減少すると、TBR は徐々に減少する。一方、基準体積から増殖材層の体積が減少すると、TBR は急激に減少する。したがって、第1層目に位置する増殖材層の TBR に注目すると、最高温 度 900[℃]で設置した層の幅を減少させることは、TBR の著しい低下を招くことがわかる。次 に、基準体積からそれぞれの充填層を増加させた場合の TBR を評価する。増殖材層の増加に よる TBR の増加に比べ、増倍材層の体積増加による TBR の増加が大きい。したがって、増殖 材層の後ろに位置する増倍材層の増加が、TBR の増加につながることがわかる。

体積比に対する最高温度の分布を Fig. 3-3 に示す。増殖材層の体積が増加すると、増殖材層 の温度は上昇し、増倍材層の温度は徐々に下降する。したがって、熱機械試験が目的である TBM において、増殖材層の幅を増加させる場合、増倍材層の温度下降に注意が必要である。一方、 増倍材層の体積が増加すると、増倍材層の温度は上昇し、増殖材層の温度も徐々に上昇する。 したがって、増殖材の健全性が保障される最高温度が存在するため、増倍材層の幅を増加させ る場合、増殖材層の温度上昇に注意が必要である。

3.1.2 第1層増殖材、第2層増倍材、第3層増殖材で増倍材層の幅を増減させた場合(1) 解析条件

次に、多層構造中において、増倍材層の体積増減が、TBRの変化に与える影響を調べる。また、3.2節で後述するが、多層構造では第1層と第3層の増殖材層がTBRの大半を担う。そこで、第1層目に増殖材、第2層目に増倍材、第3層目に増殖材を配置し、3層構造の簡略化した解析対象を適用した。増殖材は⁶Li 濃縮度 40%、増倍材層は Single Packing を適用した。ここで、MPを含む増殖材と増倍材を充填する幅の総和の上限は、設けていない。

(2) 解析結果

Fig. 3-4 に各層における TBR とその合算値である総 TBR を示す。ここで、横軸は、増倍材層と増殖材層の全体積比 $R = V_{Be} / V_{Li_2TiO_3}$ である。増倍材の増加により、第1層目の TBR は増

加し、一定値となる。一方、第3層目のTBRは、Rが約3でピークを持ち、その後減衰する。 これは、増倍材層の体積超過に伴う中性子吸収と捕獲、反射の増大によって、第3層目に入射 する中性子が減少するためである。また、総 TBR のピーク位置は、 $R = 4 \sim 5$ である。このピークが存在する $R = 4 \sim 5$ は、一次元核熱解析を行った Yanagi ら 80 の結果とも一致する。Yanagi らの解析では、超臨界圧水冷却方式の原型炉条件において、1 つの層に増殖材と増倍材を混合して充填し、体積を増減させることによって、ピーク値を求めている。本研究では、多層構造においても、 $R = 4 \sim 5$ に TBR のピークが存在することが明らかになった。

各層における最高温度の傾向を Fig. 3-5 に示す。増倍材層の幅が増加すると、第1層目の増 殖材の温度は上昇し、第3層の増殖材の温度は下降する。第1層目の増殖材の温度を下降させ るためには、増殖材層の幅を減少させる必要がある。しかし、層構造を製作する上で、施工可 能な最小幅(現在、約2.8[cm])が存在する。したがって、*R*を4~5 に漸近させる層構造の構築 過程において、増殖材の最高温度と施工可能な層の最小幅によって、増殖材層の後ろに位置す る増倍材層の幅が決定することが分かる。

3.2 現行の設計概念におけるテストブランケット・モジュールの TBR

現在の TBM の設計概念では、熱機械特性試験の目的のため、中性子照射中の増殖材、増倍 材の温度は、健全性が維持される最高温度 900[℃]、600[℃]にそれぞれ設定されている。増倍 材は Binary Packing を採用しているため、Single Packing での現行設計は存在しない。従っ て、Single Packing の解析では、現行設計概念に従い、材料の健全性が維持される最高温度で、 増殖材、増倍材層を交互に配置することとする。この現行設計概念に基づく TBM を対象に、 核熱解析を実施し、ベリリウム充填方式による充填率と ⁶Li 濃縮度の違いが TBR に与える影響 を評価する。これによって、現行設計概念の TBM の TBR を把握し、前節で得た TBR の変化 の傾向との比較を行う。(現行設計概念における TBM の温度分布と燃焼度に関しては、付録 1,2 を参照。)

(1) 解析条件

充填層の配置を Table 3-1 に記す。プラズマ側から最も近い層に増殖材層を設置し、次に増 倍材、増殖材層を交互に配置した。現在の設計では、最終層は増倍材層となっているが、本解 析では、熱中性子を無駄なくトリチウム生成に使用するため、最終層に増殖材層を採用した。 濃縮度の影響を評価するために、Li₂TiO₃に含まれる ⁶Liの濃縮度は、7.5%(天然),40%,90%の 3 ケースで解析を実施した。増殖材と増倍材における各層の幅は、材料の健全性が保たれる最 高温度の 900[℃]、600[℃]となるように設定した。また、メンブレンパネルを含む増殖材と増 倍材を充填する幅の総和は、TBM の設計条件に基づき 47.5[cm]に設定している。

(2) 解析結果

増倍材層の Binary Packing と Single Packing における TBR の分布を Fig. 3-6 と Fig. 3-7 にそれぞれ示す。濃縮度別に観察すると、Binary Packing での TBR は、Single Packing の場 合よりも大きい。Binary Packing では、充填率が高いことに加え、熱伝導率が大きいために(Fig. 2-3)、増倍材層の幅を広く設置することが可能であり、熱中性子を十分に増加させているから である。

Fig. 3-8, 3-9に各層における単位厚さ当たりのTBRの分布を示す。7Liの分布に着目すると、 濃縮度が大きいほど 7Li を含む量も少なくなるため、7Li による TBR は小さくなる。しかし、 7Li での TBR は、6Li による TBR に比べて数オーダー小さいため、Fig. 3-6, 3-7 で示した全体 の TBR に対しては無視できる値である。

各層における TBR を Table 3-2 に示す。各層で TBR を比較すると、第1層と第3層の TBR は、全 TBR に対して Binary Packing で 90%、Single Packing で 70%を担っていることがわ かる。また、第1層目と第3層目に位置する増殖材層の TBR が、濃縮度に大きく依存してい ることがわかる。その依存度を詳細に調べるために、第1層目の TBR に着目すると、6Li 濃縮 度 7.5%(天然)に対して濃縮度 90%では、Binary Packing の場合 37%増加、 Single Packing の場合 36%増加している。他方、第3層目の TBR に着目すると、6Li 濃縮度 7.5%(天然)に対 して濃縮度 90%では、Binary Packing の場合 11%増加、 Single Packing の場合 13%増加し ている。従って、プラズマ側に近い層(第1,3層目)に、高濃縮度の増殖材を充填することは、 TBR 増加の上で有効であることがわかった。

次に、体積比 $R = V_{Be} / V_{Li,TiO_3}$ について検討する。ここでは、Rの換算に最終層の増殖材を含

めない。他の増殖材層に比べ、最終層の TBR の値は、全 TBR の値に比べて小さく、層幅に対 する変化が小さいためである。ここで、Binary Packing では第 1~4 層、Single Packing では 第 1~6 層までの体積比 R を Table 3-2 に示す。Binary Packing の Rは約 4 であり、3.1.2 節 で述べた TBR のピークが存在する $R = 4 \sim 5$ の範囲に位置するため、Binary Packing の TBR は最大値付近に存在するといえる。一方、Single Packing の R は 1.2~1.4 であり、Binary Packing に比べ TBR の値は小さく、層構造の改良の余地があることがわかる。そこで、以降 では、Single Packing での TBR 増加を主眼とした、充填層配置の最適化に関して検討する。

3.3 増殖材、増倍材層の配置変更による TBR の変化の傾向

Single Packing においても高い TBR を得るための層構造を検討する。全体積比 $R = V_{Be} / V_{Li_2TiO_3}$ に対して、TBR のピークが $R = 4 \sim 5$ の範囲に存在することを、3.1.2 節で示し た。一方、 $R = 4 \sim 5$ での増倍材層の幅では、最高温度の 600[℃]を超過する。その結果、現在 の TBM 設計概念で採用されている材料の健全性が維持される最高温度で、増殖材・増倍材層を 交互に配置する層構造の Single Packing においては、十分な増倍材層の層幅を確保できない ため $R = 1.2 \sim 1.4$ であり、Binary Packing に比べ TBR が小さいことを 3.2 節で示した。そこ で、増殖材層間の増倍材層の数を増やし、各層の最高温度が、材料の健全性が維持される最高 温度の 900[℃] (Li₂TiO₃), 600[℃] (Be)を満たす層構造を検討する。

(1) 解析条件

第1層目に増殖材を配置し、増殖材層間の増倍材層の数を変えて6ケースの解析を行った。 解析を実施した層構造の一覧をTable 3-3に示す。6Li 濃縮度7.5%(天然)の増殖材2層、Single Packingの増倍材5層を用いた。また、メンブレンパネルを含む増殖材と増倍材を充填する幅 の総和は、47.5[cm]に設定している。(第1層目に増倍材層を設置した TBR の変化の傾向は付録3を参照。)

(2) 解析結果

解析結果を、Table 3-4 にまとめて示す。第1層目の増殖材層の後ろに3層の増倍材層を配置することによって、6ケースの中で最も高いTBRを得た。このときの増倍材層と増殖材層の 全体積比 $R = V_{Be} / V_{Li_2TiO_3}$ は約5であり、3.1.2節で示したピーク位置と一致する。これにより、

増殖材層間の増倍材層の数を増やすことによって、増殖材、増倍材層の最高温度 900[℃]、 600[℃]を満たしつつ、TBR 生成に対して最適な配置が可能であることがわかった。

また、増殖材層の後ろに存在する増倍材層数が増加することにより、増殖材層の幅が減少する。これは、3.1.2節で述べたように、増殖材層の最高温度 900[℃]を超過させないためである。したがって、施工最小幅(現在、約2.8[cm])を考慮すると、第1層目の増殖材層の後ろには、最大3層の増倍材層を設置可能であることがわかった。

この解析結果により、増殖材層を天然 Li (6Li 濃縮度が 7.5%)の2層構造とし、Be を Single Packing とした場合、現行設計概念である材料の健全性が維持される最高温度で、増殖材・増倍 材層を一層ずつ交互に配置した層構造 (Case 3.5) と比較して、TBR が最大で 13.4%以上改善できることを明らかにした。

3.4 TBR の変化の傾向に基づいた増殖材、増倍材層の配置の最適化

増殖材と増倍材の体積比を 4~5 に近づけることによって、より高い TBR が得られることを 3.1.2 節で示した。また、増殖材間の増倍材層の数を増加させることによって、使用限界温度と 施工可能な層の最小幅を満たしつつ、増殖材と増倍材の体積比 *R*を 4~5 に近づけることが可 能であることを 3.3 節で示した。上記で検討した TBR の変化の傾向と充填層の全領域幅を考慮 したうえで、増殖材・増倍材層(Single Packing)の配置の最適化を行う。さらに、現行設計概 念で採用さえている層を交互に置くという層構造の解析結果と比較、検討を実施する。

(1) 解析条件

層構造を Table 3-5 に示す。第1層目、第4層目、最終層を増殖材層として、増殖材層の背面に、Single Packing の増倍材層を2層ずつ配置した。増殖材の ⁶Li 濃縮度 7.5%(天然), 40%, 90%において、Be を Single Packing (充填率 62%) として解析を実施した。増殖材と増倍材における各層の幅は、材料の健全性が保たれる最高温度の 900[℃]、600[℃]となるように設定した。また、メンブレンパネルを含む増殖材と増倍材を充填する幅の総和は、47.5[cm]に設定している。

(2) 解析結果

層構造を最適化する上で、構築概念の手順を以下に示す。

- 第1層目の増殖材層の最高温度を900[℃]に設定。
 第2層目の増倍材層の最高温度を600[℃]に設定。
- ② 増殖材層(第1層目)と増倍材層(第2層目)の体積比*R*を確認。
- ③ *R*=4~5 でなければ、第3層目に増倍材層を設置。
- ④ 増殖材層(第1層目)の温度が上昇。
 増殖材層の幅を減少させ、最高温度 900[℃]に温度補正。
- ⑤ 増殖材層の幅が施工可能最小幅(現在、約2.8[cm])を大きく下回る場合は、 増倍材層幅を減少。増殖材層の幅を施工可能最小幅に変更、最高温度を900[℃]に補正。
- ⑥ 第4層目の増殖材層、第5,6層目の増倍材層も①~⑤の手順で設置。
- ⑦ 総充填幅 47.5[cm]に達していなければ、最終層に増殖材を設置。
- ⑧ 第1~7層の増殖材、増倍材層の最高温度を900[℃]、600[℃]にそれぞれ補正。

ここで示す体積比 R は、3.2 節で述べたように最終層を除いて換算された値である。増殖材 層の背面に、増倍材層を3層配置することによって、R は5 にさらに漸近する。しかし、増殖 材層が施工最小幅に達してしまう。また、総充填幅(47.5[cm])が限られているため、最終層 に増殖材層を設置できなくなる(最終層の増殖材層の TBR への寄与は付録3を参照)。この2 点を考慮して、増殖材層の背面に、増倍材層を2層ずつ配置した。

解析結果を Table 3-6 に示す。配置を最適化した解析結果(Table 3-6)と現行設計概念に基づ いた TBM の結果(Table 3-2)を比較する。Single Packing の増倍材層においても 2 層配置する ことによって、*R* は TBR のピーク付近である 4~5 の範囲に存在することがわかる。さらに、 TBR の変化の傾向を基に最適化した層配置によって、⁶Li 濃縮度 7.5%(天然),40%,90%に対 し、それぞれの TBR を約 2.0%, 3.2%, 4.4%増加させることに成功した。

4. 結論

トリチウムを生成する増殖ブランケットは、核融合炉の燃料増殖システムにおいての要であ り、ITER で工学試験される TBM は、核融合炉による発電を実証する原型炉の増殖ブランケ ットにとって礎となるものである。したがって、TBM 開発設計において、TBR と熱機械特性 試験のための温度分布の予測は、重要試験項目の一つと位置される。本研究では、日本が ITER での試験を予定している固体増殖材を用いた加圧水冷却方式のブランケットについて、一次元 核熱解析を実施した。充填層の厚さと配置に対する、TBR 並びに増殖材、増倍材充填層の内部 温度のデータベースを構築し、今後の開発設計に寄与することを目的とした。さらには、充填 層の厚さと配置の最適化による TBR の向上も検討した。

解析に際して、以下の条件を適用した。

ブランケットの冷却方式としては高い熱効率を期待できる高温高圧水冷却方式とした。

- 増殖材に Li₂TiO₃を適用し、含まれる ⁶Li の濃縮度は、7.5%(天然), 40%, 90%の 3 ケース で解析を実施する。また、Single Packing での充填とした。
- 増倍材に Be を適用し、充填方式は Single Packing と Binary Packing の二つを適用した。
- 増殖材、増倍材層の最高温度は、健全性が保障される最高温度の 900[℃]、600[℃]とした。
- メンブレンパネルを含む増殖材と増倍材を充填する幅の総和は、47.5[cm]に設定した。

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 多層構造においても、体積比 $R = V_{Be} / V_{Li_2TiO_3} = 4 \sim 5$ に TBR の最大値が存在することを明らかにした。
- (2) 現在の TBM 設計概念で採用されている材料の健全性が維持される最高温度で、増殖材・ 増倍材層を交互に配置する層構造においては、増倍材が Binary Packing の場合、Rは 4 ~5 であり、TBR の観点からもほぼ最適化された構造であることを示した。一方、増倍材 が Single Packing の場合は Rが 1.2~1.4 であり、層構造を改良することにより、より高 い TBR を得られる余地があることを示した。
- (3) Single Packing について、増倍材層に冷却管のみを挿入して実質的な層の数を増やす構造 を提案して、増殖材、増倍材層の最高温度条件を満たしつつ、TBR 生成に対して最適な *R* が 4~5 となる配置が可能であることを示した。
- (4) この結果、増殖材層を天然 Li(⁶Li 濃縮度が 7.5%)の2層構造とし、Be を Single Packing とした TBM 体系において、TBR が最大で 13.4%以上改善できることを明らかにした。

以上により、ITER で工学試験する TBM において、Single Packing と Binary Packing の両充 填方式での最適な層構造を明らかにした。さらに以下のような知見を得た。

- (5) 最高温度 900[℃]で設置した第1層目の増殖材層の幅を減少させることは、特に、TBR の 著しい低下を招くことが分かった。
- (6) プラズマ側に近い層(第1,3層目)に、高濃縮度の増殖材を充填することは、TBR 増加の上 で有効であることがわかった。

- (7) Rを4~5に漸近させる層構造の構築過程において、増殖材の最高温度と施工最小幅(現在、約2.8[cm])によって、増殖材層の後ろに位置する増倍材層の幅が決定することが分かった。 さらに、第1層目の増殖材層の後ろには、最大3層の増倍材層(Single Packing)を設置可能であることがわかった。
- (8) 増倍材が Binary Packing、Single Packing いずれの体系においても、増殖/増倍材を最高 使用温度に合わせた構造とする場合、6Li 濃縮度が各層の幅に対する影響が非常に小さい ことを示した。
- (9) TBR の最も高かった解析結果において、6Li 濃縮度 40%で Be Single Packing と Binary Packing とを比較すると、Single Packing では充填率を考慮した Be の使用量が 21%少な いにも関らず、TBR の低下は 3.9%程度であることを示した。

以上のとおり固体増殖水冷却方式 TBM のトリチウム増殖比に関する一次元核熱解析の結果 を提示するとともに、層構造に対する TBR のデータベースの構築を実施した。さらには、TBR を出来る限り確保するという視点で、核融合炉による発電を実証する原型炉を目指した TBM を設計する上で、充填層配置の構築手順を示した。今後、燃料増殖の根幹を担う TBM 設計の 進展が、研究開発の必要性を明らかにし、研究開発の進展は設計の可能性をさらに広げるよう に、TBM 開発設計を進展させる必要がある。

謝 辞

本報告書は、平成19年度に開催した、核融合エネルギー工学研究開発ユニット内TBM研究 会において、有益な技術議論を頂いた、星野毅研究員に感謝の意を表します。また、研究会に 参加し貴重な意見を頂いた方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K. Shibata, et al. : "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 -JENDL-3-", JAERI 1319, (1990).
- 真木 紘一ら: "JENDL-3 をベースとした核融合炉核計算用群定数セット FUSION-J3 の 作成", JAERI-M91-072, (1991).
- 3) 川崎 弘光: "APPLE-3: 中性子束,ガンマ線束,スペクトル,反応率分布のプロッティングコード APPLE の改良とコードマニュアルの整備", JAERI-M91-058, (1991)
- 4) 真木 紘一ら: "核発熱定数 KERMA ライブラリーの作成-核融合群定数セット FUSION-J3 用核発熱定数ライブラリー-", JAERI-M91-073, (1991).
- 5) H.Tanigawa et al. : to be submitted to J. Nucl. Mater. (2007).
- J.Reimanna et al. :"Thermal conductivity of compressed beryllium pebble beds", Fusion Eng. Des., <u>81</u>, 449(2006).
- 7) M.Dalle Donne et al. :"Proceedings of 3rd IEA international workshop on beryllium technology for fusion", JAERI-Conf 98-001, 17(1998).
- Y.Yanagi et al. :"Nuclear and thermal analyses of supercritical-water-cooled solid breeder blanket for fusion DEMO reactor", J. Nucl. Sci. Technol., <u>38</u>, 11, 1014(2001).
- 9) M.Enoeda et al. :"Conceptual Design of Solid Breeder Blanket System Cooled by Supercritical Water", JAERI-Tech 2001-078 (2001).
- 10) 関 昌弘: "核融合炉工学概論", 日本工業新聞社, Japan, pp.177-180(2001).



Fig. 2-1 Configuration of the bird view and toroidal cross-section of the proposed TBM.



Fig. 2-2 (a) Illustration of toroidal cross-section of the sub-module in TBM. (b) Computational configuration.



Fig. 2-3 Effective thermal conductivities of Be and Li_2TiO_3 pebble bed in TBM.







Volumetric ratio R '/R at the increasing width of Li₂TiO₃

Fig. 3-2 TBR as a function of the volumetric ratio of Li_2TiO_3 breeder layers and Be multiplier layer for Single pebble bed.



Volumetric ratio R '/ R at the increasing width of Li₂TiO₃

Fig. 3-3 Maximum temperature as a function of the volumetric ratio of Li₂TiO₃ breeder layers and Be multiplier layer for Single pebble bed.



Fig. 3-4 TBR as a function of the volumetric ratio of Li_2TiO_3 breeder layers and Be multiplier layer for Single pebble bed.



Fig. 3-5 Maximum temperature as a function of the volumetric ratio of Li₂TiO₃ breeder layers and Be multiplier layer for Single pebble bed.



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. 3-6 Distribution of the TBR in TBM for Binary pebble bed of the Be multiplier layers.



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. 3-7 Distribution of the TBR in TBM for Single pebble bed of the Be multiplier layers.



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. 3-8 Distribution of the TBR per unit thickness in TBM for Binary pebble bed of the Be multiplier layers.





Fig. 3-9 Distribution of the TBR per unit thickness in TBM for Single pebble bed of the Be multiplier layers.

	Items	unit	Water cooled solid breeder TBM
Structural material	Primary	-	F82H
Structual material	Temperature limit	°C	< 550
Armo	or material	-	Be (10 mm thickness)
Coolant		-	Pressurized water
Hight of first wall	to the poloidal direction	m	1.66
Width of first wall	to the toroidal direction	m	0.484
Thickness of TBM	to the Radial direction	m	0.6
Neutron wall load		MW/m^2	0.78
Surface heat flux		MW / m^2	0.3
Coolant pressure		MPa	15.5
Coolant inlet tempe	erature	C°	280
Coolant outlet temp	perature	°C	325
Coolant flow rate		kg / s	6.15
Operation scenario of induced-radioac	o for evaluation tivity	-	Continuous operation for 140 days is assumed.

Table 2-1 The Major specification of TBM for nuclear analysis.

Matarial	Layer	Distance from	EW[om]	Pebble	Back	Back side	Maah
INIALERIAI	width[cm]	FW surface[cm]	FWLCIII	bed[cm]	plate[cm]	shield[cm]	wesn
PLASMA	160.00	0.00					1
BE (armor)	1.00	1.00	1.00				3
F82H	1.00	2.00	1.00				3
FWch	0.80	2.80	0.80				1
F82H	0.70	3.50	0.70				3
1st layer (Li ₂ TiO ₃)	3.00	6.50		3.00			50
F82H	0.12	6.62		0.12			2
Coolant 1	0.41	7.03		0.41			1
F82H	0.12	7.15		0.12			2
2nd layer (Be)	9.33	16.48		9.33			30
F82H	0.11	16.59		0.11			2
Coolant 2	0.27	16.86		0.27			1
F82H	0.11	16.97		0.11			2
3rd layer (Li ₂ TiO ₃)	3.97	20.94		3.97			50
F82H	0.11	21.05		0.11			2
Coolant 3	0.27	21.32		0.27			1
F82H	0.11	21.43		0.11			2
4th layer (Be)	17.93	39.36		17.93			30
F82H	0.11	39.47		0.11			2
Coolant 4	0.27	39.74		0.27			1
F82H	0.11	39.85		0.11			2
5th layer (Li ₂ TiO ₃)	11.15	51.00		11.15			50
F82H	3.12	54.12			3.12		3
Coolant	0.36	54.48			0.36		1
F82H	5.52	60.00			5.52		5
VOID	5.00	65.00				5.00	1
SUS316LN	8.00	73.00				8.00	7
Coolant	4.80	77.80				4.80	3
SUS316LN	11.20	89.00				11.20	10
Total length[cm]	249.00	89.00	3.50	47.50	9.00	29.00	271

Table 2-2The composition for structure of TBM in the case of ⁶Li enrichment (7.5%)and Be (binary packing).

Items	unit	Use condition of the ceramic tritium breeder
Primary	-	Li ₂ TiO ₃
Temperature Limit	°C	< 900
Packing fraction	%	63 (Single Packing)
⁶ Li enrichment	%	7.5, 40 or 90
Theoretical density	g/m^3	3.435
Sintering density	%TD	81

Table 2-3 The Major specification of the ceramic tritium breeder for nuclear analysis.

Table 2-4The Major specification of beryllium neutron multiplier for nuclear
analysis.

Items	unit	Water cooled solid breeder TBM
Primary	-	Be
Temperature limit	°C	< 600
Packing fraction	%	62 (Single Packing) or 83 (Binary Packing)
Theoretical density	g/m^3	1.793
Sintering density	%TD	100

	Li-6	5			Layer's	s structı	ıre: Li₂Ti	0 ₃ ; O, I	Be ; 🗨	
Case	enrichment (%)	Packing method of Be	Items of tables for each layers	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
			Structure	0	•	0	•	0	-	-
1.1	7.5	Binary packing	Width (cm)	3.00	9.33	3.97	17.93	11.15	-	-
			Max Temp. (°C)	899.9	600.2	899.3	599.9	865.4	Ι	-
			Structure	0	•	0	•	0	-	-
1.2	40	Binary packing	Width (cm)	2.72	9.52	4.08	19.20	9.87	I	I
			Max Temp. (°C)	901.5	600.1	901.1	600.0	704.6	-	-
		90 Binary packing	Structure	0	•	0	•	0	I	1
1.3	90		Width (cm)	2.54	9.59	4.01	19.61	9.63	-	-
			Max Temp. (°C)	899.8	600.0	900.5	599.9	674.2	Ι	Ι
		5 Single packing	Structure	0	•	0	•	0		0
2.1	7.5		Width (cm)	3.36	5.54	4.21	8.16	6.20	13.74	3.19
			Max Temp. (°C)	899.1	599.1	899.2	600.0	899.6	600.2	396.3
			Structure	0		0	•	0		0
2.2	40	Single packing	Width (cm)	3.01	5.61	3.98	8.33	6.18	14.46	2.84
			Max Temp. (°C)	901.0	599.9	900.1	600.1	899.8	600.9	378.0
			Structure	0		0		0		0
2.3	90	Single packing	Width (cm)	2.82	5.65	3.86	8.40	6.16	14.70	2.83
			Max Temp. (°C)	900.3	600.7	900.7	599.7	899.2	599.9	376.9

Table 3-1The structures and physical quantities per layer in TBMs based on the
existent design concept.

Table 3-2 The TBR per layer in TBMs based on the existent design concept.

	Li-6	Packing method of Be	Volumetric ratio, R		TBR per Layer								
Case	enrichment (%)			TBR	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th		
1.1	7.5	Binary packing	3.91	1.26	0.53	Ι	0.55	-	0.18	-	-		
1.2	40	Binary packing	4.23	1.46	0.67	I	0.61	I	0.18	I	-		
1.3	90	Binary packing	4.45	1.51	0.72	Ι	0.61	-	0.17	-	-		
2.1	7.5	Single packing	1.81	1.18	0.41	I	0.40	I	0.30	I	0.08		
2.2	40	Single packing	2.00	1.36	0.52	Ι	0.45	I	0.31	-	0.08		
2.3	90	Single packing	2.10	1.40	0.56	-	0.45	-	0.30	-	0.08		

	Li-6	Packing method of	Items of tables		Layer'	s structı	ure: Li ₂ Ti	iO₃ ; O, I	Be ; ●	
Case	enrichment (%)	Be	for each layers	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
			Structure	0	•	•	•	•	•	0
3.1	7.5	Single packing	Width (cm)	2.52	5.12	6.00	7.10	8.60	9.10	7.38
			Max Temp. (°C)	901.0	599.1	599.1	599.6	600.5	526.3	900.1
			Structure	0					0	
3.2	7.5	Single packing	Width (cm)	2.62	5.21	6.18	7.38	9.07	5.79	9.21
			Max Temp. (°C)	901.8	599.4	601.6	599.8	600.1	900.2	445.2
	7.5	Single packing	Structure	0				0		
3.3			Width (cm)	2.79	5.32	6.33	7.66	4.66	11.66	7.04
			Max Temp. (°C)	899.7	600.1	600.1	600.0	899.9	600.8	392.6
		7.5 Single packing	Structure	0			0		•	
3.4	7.5		Width (cm)	3.02	5.40	6.45	3.91	9.25	11.66	5.77
			Max Temp. (°C)	899.1	600.1	599.9	900.3	601.1	601.0	376.0
			Structure	0		0	•	•	•	•
3.5	7.5	Single packing	Width (cm)	3.31	5.45	3.54	7.55	9.25	11.29	5.07
			Max Temp. (°C)	901.2	599.6	900.1	599.1	601.6	600.0	373.0
			Structure	0	0					
3.6	7.5	Single packing	Width (cm)	3.66	3.26	6.06	7.17	8.52	10.18	7.33
			Max Temp. (°C)	901.4	900.2	601.7	601.2	600.5	600.6	455.6

Table 3-3The structures and physical quantities per layer in TBM constructed of tow
breeder layers.

Table 3-4 The TBR per layer in TBM constructed of tow breeder layers.

0	Li-6	Packing method of Be	Volumetric	/olumetric		TBR per Layer							
Case	enrichment (%)		ratio, R	TBR	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th		
3.1	7.5	Single packing	3.6	1.057	0.73	-	-	-	-	-	0.33		
3.2	7.5	Single packing	4.4	1.109	0.69	-	-	-	-	0.42	-		
3.3	7.5	Single packing	5.1	1.112	0.61	-	-	-	0.50	-	-		
3.4	7.5	Single packing	5.6	1.073	0.52	-	-	0.55	-	-	-		
3.5	7.5	Single packing	5.6	0.980	0.41	-	0.57	-	-	-	-		
3.6	7.5	Single packing	5.7	0.845	0.29	0.56	-	-	-	-	-		

	Li-6	Packing method of	Items of tables	Layer's structure: Li₂TiO₃; O, Be ; ●							
Case	enrichment (%)	Be	for each layers	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	
			Structure	0	•	•	0	•		0	
4.1	7.5	Single packing	Width (cm)	3.03	5.44	6.53	4.14	9.69	7.88	8.41	
			Max Temp. (°C)	899.8	601.1	600.4	899.8	599.3	429.6	785.9	
		40 Single packing	Structure	0	•	•	0	•		0	
4.2	40		Width (cm)	2.74	5.52	6.69	4.16	10.20	7.88	7.92	
			Max Temp. (°C)	899.8	600.8	600.2	899.5	600.4	413.4	716.4	
			Structure	0	•	•	0	•		0	
4.3	90	90 Single packing	Width (cm)	2.57	5.54	6.75	4.09	10.36	7.88	7.93	
			Max Temp. (°C)	900.9	599.8	599.7	900.3	600.2	408.5	712.9	

Table 3-5The structures and physical quantities of the layers in TBM of the
optimized placement for TBR.

Table 3-6 The TBR per layer in TBM of the optimized placement for TBR.

Case	Li-6	Packing method of Be	Volumetric ratio, R	Volumetric		Layer's structure: Li₂TiO₃; O, Be ; ●						
	enrichment (%)			TBR	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	
4.1	7.5	Single packing	4.1	1.204	0.52	I	-	0.51	-	-	0.18	
4.2	40	Single packing	4.4	1.403	0.66	-	-	0.56	-	-	0.18	
4.3	90	Single packing	4.6	1.461	0.71	-	-	0.57	-	-	0.18	

付録1 現行設計概念における TBM の温度分布

(解析条件)

現在の TBM の設計概念では、熱機械特性試験の目的のため、中性子照射中の増殖材、増倍 材の温度は、健全性が維持される最高温度 900[℃]、600[℃]にそれぞれ設定されている。増倍 材は Binary Packing を採用しているため、Single Packing での現行設計は存在しない。従っ て、Single Packing の解析では、現行設計概念に従い、材料の健全性が維持される最高温度で、 増殖材、増倍材層を交互に配置することとする。この現行設計概念に基づく TBM を対象に、 核熱解析を実施する。それにより、ベリリウム充填方式による充填率と 6Li 濃縮度の違いが温 度分布に与える影響を評価する。ここで、本解析では、現行設計の層構造とは異なり、熱中性 子をトリチウム生成に利用するため、最終層に増殖材を採用している。そのため、最終層の増 殖材は熱機械特性試験の最高温度 900[℃]を満足していない。また、本解析ではペブルと接す る壁面の熱伝達率は考慮に入れていない。

(解析結果)

増倍材層の Binary Packing と Single Packing における温度分布を Fig. A1-1, A1-2 にそれ ぞれ示す。Binary Packing では、充填層の有効熱伝達率が大きく(Fig. 2-3)、増倍材層の幅 を大きく設置できる。一方、Single Packing では、有効熱伝達率が小さいため増倍材層の幅が 小さくなり、TBM を構成する層の数が多くなることが特徴である。

ここで、最高温度の観点から、6Li 濃縮度の違いが与える層の幅への影響を検討する。Fig. A1-3, A1-4 に中性子核発熱分布を示す。特に第1層目では、6Li 濃縮度が増加するほど、中性子核発熱が大きくなる。そのため、増倍材の充填方式に関わらず、増殖材層の最高温度を900[℃] にするためには、6Li 濃縮度が増加するほど、増殖材層の幅は小さくなる。より詳細に濃縮度の違いによる層の幅を調べるために、Table 3-1 に各層の幅を示す。6Li 濃縮度が 7.5%から 90% に増加すると、第1層目の増殖材層の幅は、Single Packing で約 15%、Binary Packing で約 16%の減少率となる。したがって、高濃縮度の増殖材を用いる場合は、充填層を設計する上で施工可能な最小幅に注意が必要となる。

次に、Single Packingの増倍材層において、ある濃縮度の増殖材層で最高温度 900[℃]、増 倍材層の最高温度 600[℃]と熱機械設計された層構造に、異なる濃縮度の増殖材を充填した場 合の温度分布を検証する。6Li 濃縮度 7.5%(天然)のペブル充填が前提で熱機械設計された層の 幅に、6Li 濃縮度 90%のペブルを充填した温度分布を Fig. A1-5 に示す。第1層目に位置する 増殖材層の最高温度が、材料の健全性が保障される温度 900[℃]を超えて約 1030[℃]となる。 したがって、低い濃縮度で設計された層構造に、高い濃縮度の増殖材を充填することは、増殖 材料の健全性上、好ましくないことが分かる。他方、6Li 濃縮度 90%で設計された層構造に、 6Li 濃縮度 7.5%(天然)の増殖材を充填した場合の温度分布を Fig. A1-6 に示す。全ての増殖材層 の最高温度は 900[℃]以下もしくは約 900[℃]となる。一方、全ての増倍材層の最高温度は、 600[℃]以上となり、特に、第6層目の増倍材層では、最大で約 650[℃]となる。したがって、 高い濃縮度で設計された層構造に、低い濃縮度の増殖材を充填することは、増倍材料の健全性 上、好ましくないことが分かる。ここでは示さないが、増倍材層を Binary Packing に設定した温度分布においても、同様の傾向を得た。

以上より、ある ⁶Li 濃縮度の増殖材層で熱機械設計された層構造に異なる濃縮度の増殖材を 充填する場合は、充填層幅の設計変更を行う必要がある。 付録 2 現行設計概念における TBM の増殖材層における 6Li 燃焼度の評価

(解析条件)

本文 3.2 節における現行の設計概念におけるテストブランケット・モジュールの核熱解析で 導出した 6Li の燃焼度を報告する。6Li の燃焼度(*Bu*[%])は以下の式で表される。

$$Bu = \frac{n0(r_i) - n(r_i)}{n0(r_i)} \times 100$$
(3)

ここで、*n*0(*r_i*) [m⁻³]は位置 *r_i*における初期 ⁶Li 核密度、*n*(*r_i*) [m⁻³]は位置 *r_i*における *t*[s]後の ⁶Li 核密度である。*n*(*r_i*)の時間変化は以下の式で表される。

$$\frac{dn(r_i)}{dt} = -\sigma\phi(r_i) \cdot n(r_i) \tag{4}$$

t [s]は稼働時間、 σ [m²]はLi-6のT生成断面積、 $\phi(r_i)$ [m⁻²s⁻¹]は位置 r_i における中性子フラ ックスである。中性子フラックスの空間分布およびエネルギースペクトルが、増殖材の寿命に わたって不変と仮定した場合、式(4)の線形微分方程式を解くと以下のようになる。

$$n(r_i) = n0(r_i) \cdot \exp(-\sigma\phi(r_i) \cdot t)$$
(5)

一方、位置 *r_i*における単位面積当たりのトリチウム増殖比 *TBR*(*r_i*)[m⁻¹]は、Ψ(*E* 0)[m⁻²s⁻¹]: 14MeV 中性子発生量を用いて

$$TBR(r_i) = \frac{\sigma\phi(r_i) \cdot n0(r_i)}{\Psi(E0)}$$
(6)

と表される。

式(3)、(5)、(6)より、増殖材に含まれる 6Liの燃焼度(Bu)と 6Liによるトリチウム生成反応率の間には、以下の式が導出される 9。

$$Bu = \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{TBR(ri) \cdot \Psi(E0)}{n0(ri)} \cdot t\right) \right\} \times 100$$
(7)

ここで、Table 2-1 に示すように中性子壁負荷は 0.78[MW/m²]、初期 ⁶Li 濃縮度が 7.5%(天然)、 40%および 90%の場合において、燃焼度をそれぞれ検討した。稼動期間は、ITER のパルス運転を定格運転に換算した 140 日である。

(解析結果)

燃焼度(Bu)の空間分布と各層でのバルク平均燃焼度(Bu_{ave})を Fig. A2-1, A2-2に示す。ITER 運転末期における Bu_{ave} の最大値は、6Li 濃縮度 7.5%、Binary Packing で約 5%、Single Packing で約 3%である。つまり、増倍材層の充填率にかかわらず、6Li の初期濃縮度が大きい場合、Buは小さい。これは、濃縮度による TBR の変化率よりも初期 6Li 核密度 $n0(r_i)$ の変化率が大き いことに起因する。そのため、高濃縮になるほど、Buは小さくなることが式(7)からわかる。

さらに、Enoeda らの研究 ⁹により 33%の燃焼度で、TBR の減少率は、約 1%程度となることが知られている。したがって、初期 ⁶Li 濃縮度や増倍材層の充填率に関わらず、ITER 運転

初期から後期の TBR の減少率は、1%以下となることがわかる。さらに、燃焼度の観点からは、 層ごとに濃縮度を変えることによって、初期の濃縮度分布に勾配をつける必要がないことがわ かった。また、濃縮度に関わらず、ITER 運転期間の TBR は、保障されていることが確認され た。

付録3 第1層目に増倍材層を配置した場合のTBR

(解析条件)

第1層目に増倍材層を配置し、層幅の増減による TBR の変化の傾向を評価する。解析対象 の層構造を Table A3-1 に示す。第1層目に Binary Packing の増倍材層を設置し、6Li 濃縮度 40%の増殖材、増倍材層を交互に配置した。第2層目から第4層目までの増殖材層と増倍材層 の幅は、充填材料の健全性が維持される最高温度の 900[\mathbb{C}](Li₂TiO₃), 600[\mathbb{C}](Be)となるよう に設定した。第6層目の増殖材層の幅は 2.8[cm]に固定し、第5層目の増倍材層の幅は、充填 層の総幅が 47.5[cm]となるように設定した。第1層目の増倍材層の幅を、最高温度の 600[\mathbb{C}] となる幅から施工可能な最小幅まで減少させて、TBR の変化の傾向を観察した。第1層目の増 倍材層を排除し、第1層目を増殖材層とした層構造も Table A3-1 に示す。ここで、第1層目 を増殖材層とした体積比は、増倍材層を第1層とした Case5.2 の体積比(R=3.1)と一致させ た。そのため、充填層の総幅は 40[cm]と小さくなっている。最終層の増殖材が TBR に与える 影響を評価するために、最終層(第6層目)の増殖材を増倍材に置き換えた解析も行った。この 場合の体積比は、TBR がほぼ最大値を示す R=4.8 に設定した。

(解析条件)

解析結果を Table A3-2 に示す。第1層目の増倍材層の幅を減少させることによって、TBR は増加する。また、第1層目の増倍材層の幅が大きい程、第2層目の TBR は増加するものの、 第4層目の TBR の減少が大きい。これは、増倍材層よる中性子吸収および中性子捕獲¹⁰⁾が理 由である。さらに、第1層目の増倍材層を排除し、第1層目を増殖材層とした TBR は、同じ *R*にもかかわらず、第1層目が増倍材層の場合よりも大きい。したがって、第1層目に増倍材 層を配置することは、TBR の増加に対し、有効でないことが分かった

次に、最終層の増殖材を増倍材に置き換えた解析結果では、第4層目の増殖材層のTBRは 増加するものの、最終層の増殖材層で稼いだTBRの減少分が大きく、TBRが小さい。したが って、*R*=4~5を目指すと同時に、最終層の増殖材層の設置が、中性子を効率良く使用するた めにも重要であることがわかった。



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. A1-1 Distribution of the temperature in TBM for Binary pebble bed of the Be multiplier layers.



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. A1-2 Distribution of the temperature in TBM for Single pebble bed of the Be multiplier layers.



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. A1-3 Distribution of the heating rate in TBM for Binary pebble bed of the Be multiplier layers.



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. A1-4 Distribution of the heating rate in TBM for Single pebble bed of the Be multiplier layers.



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]





Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. A1-6 Distribution of the temperature in the layer structure of ⁶Li enrichment 90%.



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. A2-1 Distribution of the burnup in TBM for Binary pebble bed of the Be multiplier layers.



Distance from exterior of the first wall of the plasma side [cm]

Fig. A2-2 Distribution of the burnup in TBM for Single pebble bed of the Be multiplier layers.

					-					
	Li-6	Items of tables		Layer's structure: Li₂TiO₃ ; O, Be ; ●						
Case enrichment (%) Pack		Packing method of Be	for each layers	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	
			Structure		0		0		0	
5.1 40	Binary packing	Width (cm)	7.26	2.92	13.29	7.03	11.60	2.80		
		Max Temp. (°C)	600.1	906.5	603.9	911.6	357.4	351.8		
			Structure		0	•	0	•	0	
5.2 40	Binary packing	Width (cm)	4.00	2.79	11.60	5.49	18.22	2.80		
		Max Temp. (°C)	409.6	901.2	600.3	899.7	469.1	358.1		
			Structure		0	•	0	•	0	
5.3 40	Binary packing M	Width (cm)	2.80	2.78	11.05	5.16	20.31	2.80		
		Max Temp. (°C)	361.4	901.6	600.0	911.7	523.7	360.2		
			Structure	-	0	•	0		0	
5.4 40	40	Binary packing	Width (cm)	-	2.72	9.52	4.08	19.20	2.80	
		Max Temp. (°C)	-	904.3	605.1	915.1	605.0	396.7		
			Structure		0	•	0			
5.5	40	Binary packing	Width (cm)	2.80	2.78	11.05	5.04	20.78	2.80	
			Max Temp. (°C)	361.5	902.4	601.8	902.4	553.7	315.1	

Table A3-1The structures and physical quantities per layer in TBM composed of the
top layer of the neutron multiplier.

Table A3-2The TBR per layer in TBM composed of the top layer of the neutron
multiplier.

	Li–6	Packing method of	Volumetric				TBR pe	er layer		
Case	enrichment (%)	Be	ratio, R	TBR	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
5.1	40	Binary packing	2.5	1.231	-	0.84	-	0.34	-	0.05
5.2	40	Binary packing	3.1	1.327	-	0.80	-	0.45	-	0.08
5.3	40	Binary packing	3.2	1.355	-	0.77	-	0.49	-	0.10
5.4	40	Binary packing	3.1	1.446	-	0.67	-	0.62	-	0.16
5.5	40	Binary packing	4.8	1.273	-	0.77	_	0.50	_	_

表1 SI 基本単位

II 基本単位	
金本単 名称 記号	1. 7
長 さメートル m	
質 量キログラム kg	
時 間 秒 s	
電 流アンペア A	
熱力学温度 ケルビン K	
物 質 量 モ ル mo]	
<u>光 度 カンデラ cd</u>	

表2.	基本単位を用いて表されるSI組立単位の例
-----	----------------------

如云昌	SI 基本単位				
和卫王里	名称	記号			
面 積	平方メートル	m ²			
体積	立法メートル	m ³			
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s			
加 速 度	メートル毎秒毎秒	m/s^2			
波 数	毎メートル	m-1			
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³			
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg			
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2			
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m			
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	$mo1/m^3$			
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2			
屈 折 率	(数 の) 1	1			

主ち	S T	掉頭鈺

		A 0. 0	山风残田		
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨ タ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10 ⁻³	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デ カ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	у

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位 SI 組立単位

			31 和五中世	
組立量	夕称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
	和你	品与	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(a)	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立 体 角	ステラジアン ^(a)	$\mathrm{sr}^{(\mathrm{c})}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周 波 数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2}$
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷,電気量	クーロン	С		s•A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$\mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{kg}^{-1} \cdot \mathbf{s}^3 \cdot \mathbf{A}^2$
磁東	ウェーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光東	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
照度	ルクス	1x	1m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネル	ガレイ	Gw	T/ka	m ² • a ⁻²
ギー分与, カーマ		ay a	J/Kg	m•s
線量当量,周辺線量当			- //	
量, 万向性線量当量, 值	シーベルト	Sv	J/kg	m ⁴ • s ⁻²
人禄重当重, 組織線量当				

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号"1"は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4.単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

和立量	SI 組立単位		
和立里	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa•s	m ⁻¹ · kg · s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N•m	m ² · kg · s ⁻²
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg • s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg•s ⁻³
熱容量,エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム 毎ケルビン	J/(kg \cdot K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケ ルビン	₩/(m • K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メート ル	$\mathrm{J/m}^3$	m ⁻¹ • kg • s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m • kg • s ⁻³ • A ⁻¹
体 積 電 荷	クーロン毎立方メート ル	C/m^3	m ⁻³ •s•A
電 気 変 位	クーロン毎平方メート ル	$\mathrm{C/m}^2$	m ⁻² •s•A
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mo1^{-1}$
モルエントロピー, モ ル 熱 容 量	ジュール毎モル毎ケル ビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及び y線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ • s • A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル 毎ステラジアン	W/(m ² · sr)	m ² • m ⁻² • kg • s ⁻³ =kg • s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	0	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	1B=(1/2)ln10(Np)

表7.国際単位 SI単位で	Z系と併 表され	用されこれに属さない単位で る数値が実験的に得られるもの
名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8.国際単位系に属さないが国際単位系と 併用されてこの他の単位

			1开.	用されるての他の単位
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値
海		里		1 海里=1852m
1	ッ	ŀ		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
P	_	N	а	$1 a=1 dam^2=10^2 m^2$
\sim	クター	N	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バー		N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0. 1nm=10 ⁻¹⁰ m
バ	-	\sim	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

	名称		記号	SI 単位であらわされる数値				
エ	ル	グ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダ	イ	\sim	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポ	ア	ズ	Р	1 P=1 dyn⋅s/cm²=0.1Pa・s				
スト	ーク	ス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s				
ガ	ウ	ス	G	$1 \text{ G} 10^{-4} \text{T}$				
エル	ステッ	ド	0e	1 Oe ^(1000/4π)A/m				
マク	スウェ	ル	Mx	1 Mx ^10 ⁻⁸ Wb				
ス・	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$				
朩		ŀ	ph	1 ph=10 ⁴ 1x				
ガ		ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{m/s}^2$				

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例									
名称					記号	SI 単位であらわされる数値			
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq			
$\boldsymbol{\nu}$	ン	F	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$			
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy			
$\boldsymbol{\nu}$				A	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv			
Х	線	j	単	位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm			
ガ		\sim		7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$			
ジ	ヤン	17	、十	-	Jу	1 Jy=10 ⁻²⁶ W • m ⁻² · Hz ⁻¹			
フ	エ		N	R		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m			
メートル系カラット						1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg			
F				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa			
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa			
力			IJ	-	cal				
Ξ	ク		D	\sim	μ	$1 u = 1 u m = 10^{-6} m$			

