



核融合炉用 W-B-C 系放射線遮蔽材料

W-B-C Radiation Shielding Materials for Fusion Reactors

中林 誠治*
Seiji Nakabayashi

三浦 径
Kei Miura

松田 直也
Naoya Matsuta

核融合炉の超伝導コイルを放射線から防護するための遮蔽材は、設置領域が限られる問題があり、放射線遮蔽性能に優れた材料の開発が求められている。タングステン（W）とホウ素（B）の化合物は遮蔽性能に優れるが、破壊じん性が低い課題がある。本開発では W-B 化合物を炭素（C）添加によって機械的特性を向上させるコンセプトで破壊じん性の向上を進めた。遮蔽性能の評価検討には遮蔽シミュレーションソフト（PHITS）を用いた。諸特性の評価として、密度・ビッカース硬度・破壊じん性値を測定した。本報では開発材の遮蔽性能、諸特性の詳細を述べる。

A shielding material to protect superconducting coils of fusion reactors from radiation faces the challenge of limited space, thus necessitating the development of materials with superior shielding performance. Tungsten-boron (W-B) compounds exhibit excellent shielding performance but suffer from low fracture toughness. In this study, A.L.M.T. Corp. aimed to enhance the mechanical properties, particularly fracture toughness, by adding carbon (C) to W-B compounds. The shielding performance was evaluated using the Monte Carlo particle transport simulation code PHITS. The fabricated materials were characterized by measuring density, Vickers hardness, and fracture toughness. This report details the shielding performance and various properties of the developed material.

キーワード：核融合、タングステン、遮蔽材料、粉末冶金、破壊じん性

1. 緒 言

近年、脱炭素社会の実現に向けた次世代エネルギーとして、フュージョンエネルギーが注目され、核融合炉^{*1}に関する研究開発が世界的に活発化している。なかでも重水素（D）と三重水素（T）を用いる D-T 核融合反応は、燃料を海水由来資源から得ることができるため、資源的な制約が小さい有望なエネルギー源として期待されている。一方で、D-T 反応では約 14 MeV の高速中性子が発生し、炉内材料に大きな影響を及ぼす。特に、プラズマを閉じ込めるために強い磁場を発生させる超伝導コイルは、中性子^{*2}照射によって性能劣化や加熱によるクエンチが生じるおそれがあるため適切な遮蔽材の設置が不可欠である。また、核融合炉内では遮蔽材を設置できる空間が限られていることから、少ない厚みで高い放射線遮蔽性能を発揮する材料の開発が求められている。このような背景のもと、ほう化タングステン（W-B）系化合物は高い遮蔽効率を有する材料として注目されている⁽¹⁾。しかしながら、W-B 系化合物は構造材として適用するには破壊じん性などの機械的特性が低く、改善する必要がある。

そこで当社では、ほう化タングステン化合物の優れた遮蔽性能を維持しつつ、機械特性の向上を図ることを目的として、タングステン-ホウ素-炭素（W-B-C）化合物からなる新たな遮蔽材料を開発した。炭素添加の主目的は、W-B マトリックス中に比較的高い破壊じん性を有する炭化タングステン（W-C）相を形成させ、全体的に破壊じん性を向上させることである。

2. 試料作製および実験方法

2-1 試料作製と特性評価

図1に開発材の作製プロセスを示す。開発材は、W 原料、B 原料、C 原料を混合し、ホットプレス装置を用いて加圧焼結する粉末冶金法により作製した。その後、焼結体の両面を研削し、片面は鏡面研磨を行った。

作製した試料の一覧を表1に示す。W-B-C からなる開発材の他、参照材として W-B 化合物である WB、W₂B₅ を作製した。

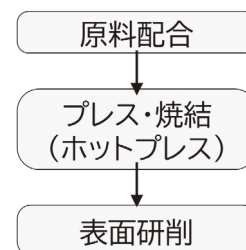


図1 作製プロセス

表1 作製した試料一覧

試料	W ₂ B ₅	WB	WBC_A1
目的	参照材		開発材 (炭素添加)

各試料に対し、X線回折法（XRD）による相同定を行った後、密度測定（アルキメデス法）、ヤング率測定（超音波パルス法）、ビッカース硬度測定、破壊じん性測定（圧子圧入法、IF 法）を行った。

2-2 計算による遮蔽能力の評価

遮蔽能力の計算には、モンテカルロ粒子輸送シミュレーションコード（PHITS⁽²⁾ ver.3.31）を用いた。設計組成や密度などのパラメータを用いて中性子の流束を算出した。透過率 T を以下（1）式のように定義して、遮蔽能力を評価した。透過率計算モデルは図2の通りである。

$$T = F_1 / F_0 \dots\dots\dots (1)$$

F_1 放射線遮蔽材を透過した後の流束 (1/cm²/source)
 F_0 放射線遮蔽材を透過する前の流束 (1/cm²/source)

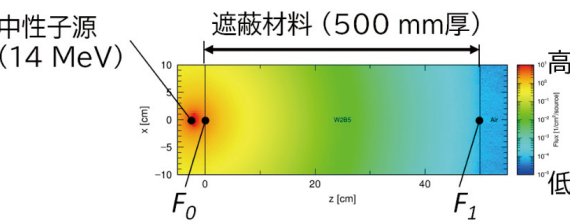


図2 PHITSでの透過率計算モデル

中性子源のエネルギーは、D-T反応により発生する中性子のエネルギーである14 MeVに設定した。

透過率 T は数値が小さいほど、その材料の遮蔽能力が高いことを示している。本開発ではWBの透過率 T_{WB} を基準にした透過率の相対値 T/T_{WB} を算出し、各試料間で遮蔽性能の比較を行った。

3. 実験結果

3-1 作製試料の密度および組成の確認

作製した試料の特性評価結果を表2に示す。作製されたすべての試料の相対密度は97%を超えており、それぞれの理論密度に近い値を示した。

表2 測定結果

評価項目		W ₂ B ₅	WB	WBC_A1	方法
密度	(g/cm ³)	10.87	15.41	15.50	アルキメデス法
相対密度	(%)	97.23	97.88	98.55	
ヤング率	(GPa)	578.8	523.4	535.9	超音波パルス法
硬さ	HV30	2246	1897	1719	ビッカース硬さ
破壊じん性	(MPa m ^{1/2})	(4.5)	4.5	5.2	IF法

開発材は材料設計の通りW-C相を含んでいることを確認した。

IF法による破壊じん性値の測定結果を図3に示す。JIS R1607に準拠して、ビッカース硬度、き裂長さ、ヤング率を用いて破壊じん性値を算出した。図4に圧痕の様相を示す。なお、W₂B₅の破壊じん性値については、図4右側のように辺の一部が崩れた圧痕が多く、規格の条件を満たさなかったため参考値である。

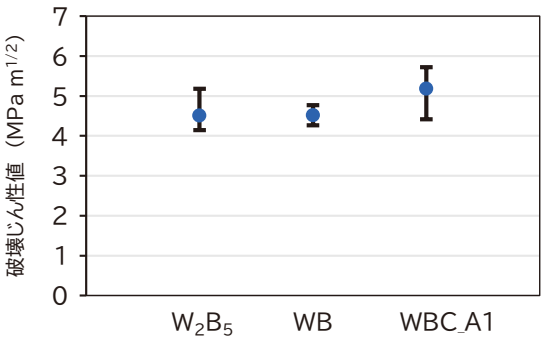


図3 開発材の破壊じん性

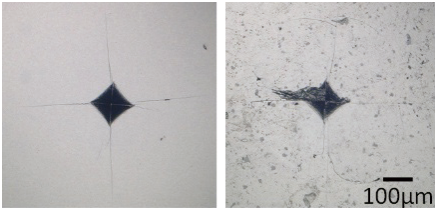


図4 ビッカース圧痕の例

図5に示すように、W₂B₅のビッカース圧痕が崩れた割合は他の試料の割合よりも高かった。W₂B₅固有の脆性や製造プロセスによって、圧痕の崩れを招いたと思われる。

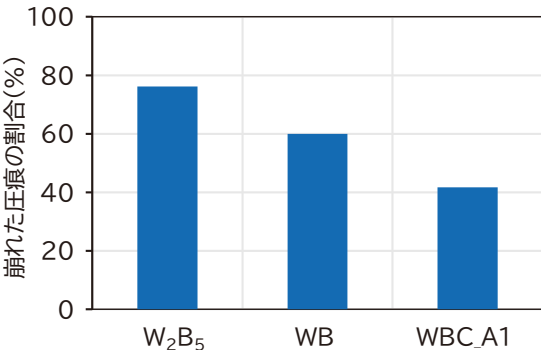


図5 崩れた圧痕（ビッカース）の割合

3-2 PHITSによる遮蔽能力の評価

破壊じん性値の測定で参考値となった W_2B_5 を除き、PHITSによる遮蔽能力計算を行った。本計算では実使用条件に近い遮蔽能力を計算するために、遮蔽材の密度は測定値を用いた。図6に示すように、WBC_A1の遮蔽能力は、WBの値とほぼ同等であった。

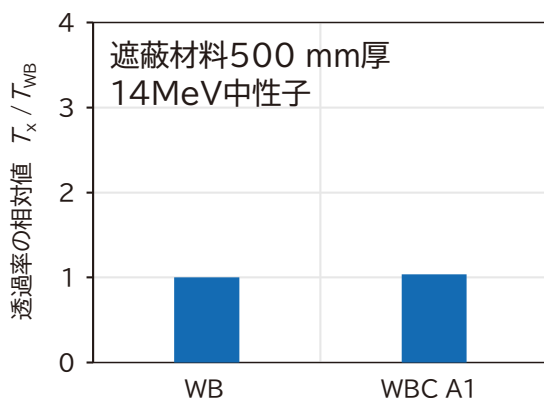


図6 開発材の遮蔽能力相対比較

4. 結 言

タングステン-ホウ素-炭素からなる遮蔽材料の試作に成功した。この開発材は、既存のW-B化合物と同等の遮蔽能力を有し、機械的特性も向上した。

核融合炉の商業化には炉体の小型化が必須となる。実現には遮蔽効率が高く限られたスペースでも遮蔽できる材料が求められる。そして構造信頼性を高めるためにも破壊じん性などの特性も今後求められていくと予想される。当社は早期から遮蔽材料の開発・PRを開始しており、国内外で大きな反響を得ている。将来の核融合炉への採用に向け、機械的特性をさらに向上させるべく、遮蔽材料の製法や成分等の最適化を継続していく。

用語集

※1 核融合炉

核分裂反応を用いた既存の原子炉とは異なり、核融合反応を用いる炉。重水素と三重水素との核融合反応では、ヘリウムと中性子が生成される。

※2 中性子

陽子とともに原子核を構成する電荷を持たない粒子。他の放射線に比べ物質を透過しやすく遮蔽が難しく、材料に照射損傷や放射化を引き起こす。

参考文献

- (1) M.Athanasakis et al., "A high temperature W_2B-W composite for fusion reactor shielding," *Journal of Nuclear Materials*, 532 (2020), 152062
- (2) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Ratliff, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver, and K. Niita, "Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33," *J. Nucl. Sci. Technol.* 61, 127-135 (2024)

執筆者

中林 誠治* : (株)アライドマテリアル
グループマネージャー



三浦 径 : (株)アライドマテリアル



松田 直也 : (株)アライドマテリアル 主務



*主執筆者