

21-P29

DESIGN OF 100KW PROTON BEAM STOPPER FOR BTA IN JAERI

M. KAWAI*, K. SAKOGAWA**, M. MIZUMOTO, J. KUSANO

K. HASEGAWA, H. OGURI, N. ITO and H. MURATA***

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan

ABSTRACT

The design study on the proton beam stopper with 100 kW average power of BTA (Basic Technology Accelerator) has been made as a one of the activities of the OMEGA Project. The stopper is composed of copper plates and a sheathing of carbon fiber complex material and tungsten alloy W-30Cu. Heat flux input at the beam stopper is assumed 1.68 and 5MW/m². Analysis of temperature distributions and thermal stress is made with the finite element method code ABAQUS. The calculated results verify that the stopper satisfies the design criteria on thermal properties.

原研BTAの100kW陽子ビームストッパーの設計

1. はじめに

原研では、OMEGA計画の一環として大強度陽子加速器の開発を行っている¹⁻³⁾。その前段部の加速器である技術開発用加速器BTAは、ビームエネルギー10MeV、平均ビーム電流10mA（ピーク電流100mA、10ms幅）で運転される。BTAのHEBT系では、100kWの過酷な熱負荷条件に耐えるビームストッパーが必要である。今回その設計を行った。以下、ストッパーの構造と熱・応力解析の結果を示す。

2. ビームストッパーの構造

設計に際して熱的な条件は、入射ビームが10ms、100Hzであることから、平均値の100kWを考慮すれば良い。しかし、これをDTLを出したと同程度のビームサイズで受けることは、ほとんど不可能であり、入熱密度を下げる必要がある。因みに、ビームストッパーの設計例⁴⁻⁶⁾を表1に示す。ビームストッパーの基本的な形状は、入射ビームの種類、エネルギーが同じFMIT原型機を参考に銅製平板形状とし、ビームを斜めに受けることとした。そして、入熱密度の条件は、ビームが正規分布しているとして中心部（冷却チャンネルの幅 直径1cm内）で1.68MW/m²と5MW/m²の2ケースをとった。この条件を満たすには、それぞれ

表1 ビームストッパーの設計例

装置	FMIT原型機	JT60	ITER
目的	ビームストッパー	NBIターゲット	ターゲット
ビーム	10MeV p	100kV p	~100kV d
入熱密度	5 MW/m ²	5 MW/m ²	15 MW/m ²
材料	黒鉛被覆銅	0.2%Ag+Cu	CC材+Cu
形状	平板	鉢型	平板
冷却チャネル	非円形	円形	—

ビームサイズ：30cmと20cm

ビーム入射角：15度と20度

とすれば良い。

熱吸収の面と機械的強度からは、熱伝導度の優れた銅をストッパーの基板とする。しかし、銅は10 MeVの陽子と(p, n)反応により2次中性子を大量に生成するという問題がある。従って、微量の¹³Cが2次中性子を生成するものの、主成分の¹²Cが全く生成しない炭素を銅の表面を被覆することによって、中性子生成を抑制することができる。しかし、その場合、最も一般的な材料の黒鉛を採用すると熱伝導度が低いために炭素の表面温度が非常に高くなる。例えば、FMIT原型機の場合には、厚さ6mmの黒鉛が用いられたが、その表面温度は1,400℃にもなる。最近、熱伝導度が非常に良好な炭素繊維複合材料（CC材）が開発され、核融合炉ITERのダイバータ材として検討されている。これは、繊維

* Toshiba Corporation

** Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

*** Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

方向の熱伝導度が銅並みに高いことと、繊維垂直方向の熱膨張率が金属なりに高いという特徴を持っている。従って、BTAのビームストッパーの被覆材としてこの炭素CC材を採用することにした。

CC材の難点は、繊維を束ねてできているだけに、銅板に接合する際の高温での加工時や長期に使用した場合に亀裂が入ることで、後者の場合、陽子ビームが銅板を直接にたたき危険性がある。その主要因は、CC材と基板の銅の熱膨張率の違いによる熱応力である。特に、1次元CC材（例えばMFC-1）では、その可能性がある。その対策も含めて、ビームストッパーの構造を下記のように選定した。

a) CC材の熱応力対策と照射損傷時の交換を容易にするため、タイル方式（50mmx50mm角程度のサイズ）を採用。これによりモジュール化が可能である。

b) CC材の熱応力による亀裂対策として、
・ [MFC1 10mm / W-30Cu 3mm / Cu 3mm] の組み合わせ

第2層のタングステンの合金 W-30Cuは熱膨張率がMFC-1とほとんど同じで、機械的強度が強いので、銅の熱応力をこの層と銅の塑性変形で吸収することができる。

タイル接合材は、タイル交換の頻度が高いと考えられるビーム中心部でははんだ又は低温銀鉛（融点400℃以下）を用い、交換が不要な周辺部には銀鉛（融点～800℃）を用いる。

冷却系は、図1に示すように銅板中にピッチ1cmの間隔で配列した断面が0.643 cm²の縦長のチャンネル24本で構成する。各チャンネルはストッパーの外縁

で連結し、全部で4ループとする。給水温度は25℃、流速は4 m/sとする。

3. 熱設計

a. 計算法

熱設計の課題は、主要部の温度とCC材の熱応力である。具体的な目標は下記の通りである。

CC材表面温度： 1,000℃以下

タイル下面温度： 400℃以下

冷却チャネル壁面温度： 180℃を越えない

（蒸気圧 10気圧以下；
サブクール沸騰許容）

冷却水出口温度： 100℃以下

熱応力 F： CC材に破損を来さない
（MFC1では $F < 0.3 \text{ kgf/mm}^2$ ）

ビームの分布について正規分布を仮定、1次元の熱伝導の解析式と直管乱流の冷却式を使用し、最も入熱条件の厳しいビーム中心位置での水温などの温度分布を評価した上で、ABAQUSコードにより詳細計算を行った。その計算に必要な縦長の冷却チャンネル壁面での熱伝達率

$$h = (\lambda \cdot d_e) \text{Nu} \quad (\lambda : \text{水の熱伝導率})$$

は、流体での代表的な無次元量ヌセルト数に関するDittus-Boelterの式 ($10^4 \leq \text{Re} \leq 10^5$, $1 \leq \text{Pr} \leq 10$)

$$\text{Nu} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4}$$

によって求めた。ここで、 d_e は等価直径 ($d_e = 4S/L = 0.679 \text{ mm}$, S:チャンネル断面積, L:チャンネル周長)であり、ReとPrはそれぞれ無次元量のレイノルズ数とプラントル数である。これらの無次元量は、 $\text{Re} = 7.158 \times 10^4$, $\text{Pr} = 2.331$ (77℃の値)、 $\text{Nu} = 247$ となる。その結果得られた熱伝達率は $24.2 \text{ kW/(m}^2 \cdot \text{K)}$ となる。また、入熱密度が 1.68 MW/m^2 と 5 MW/m^2 の時の水温は、 29.1°C と 37.3°C である。その他のABAQUS計算の物性値は文献5から採用した。

ABAQUS計算は、先ず1/2セル2次元モデルにより温度の詳細分布を求めた。その結果に基づいて熱応力計算を実施したが、隣接するタイルとの境界条件の設定により結果がかなり影響されるため、3次元モデルによって熱応力計算を行った。

b. 計算結果

ビームストッパーへの入熱量が、 1.68 MW/m^2 と 5 MW/m^2 のそれぞれの場合において代表的な位置での温度について、ABAQUSコードの結果と解析式での結果

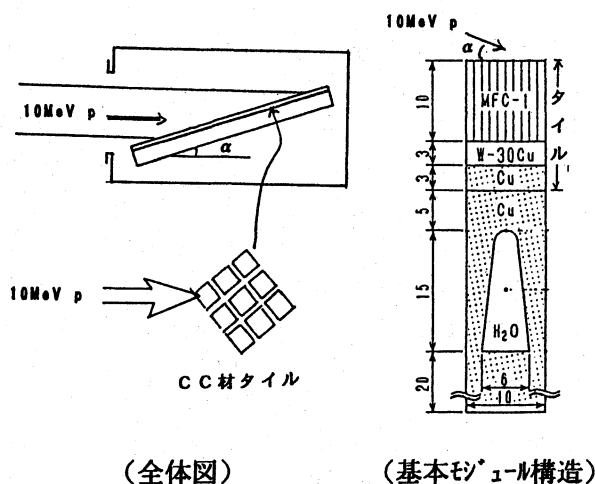


図1 ビームストッパーの概念図

(1.68MW/m²の時のみ)を比較して図2に示す。入熱量が1.68MW/m²の時はもちろんのこと、5MW/m²の場合でも、熱的にもっとも厳しい冷却チャンネル表面を含めて設計条件をみたしていることがわかる。また、ABAQUS計算結果と解析値を比較すると、両者は、チャンネル頂点温度に相違があるが、頂点からCC材表面までの多重層での温度上昇については、81.2℃と85.5℃とかなり近い。

図3には、3次元モデルによる1.68MW/m²の入熱における熱変位の計算結果を示す。さらに熱変位と熱応力について表2に示す。最大熱変位は、面に沿う方向(横方向)で103μm、縦方向で59.3μmである。その場合、MFC-1には横方向に最大0.008kg/mm²の引っ張り応力がかかる。これはMFC-1の限界応力0.3kg/mm²を下回っている。また、W-30Cuと銅についてミゼス応力の最大値は、13.8kg/mm²と16.2kg/mm²である。ただし、銅については、0.2%塑性変形の耐力7kg/mm²を越えており、塑性変形は避けられない。

なお、第2層のW-30Cuを銅で置き換えた場合には、横方向の最大変位量が131μmに増加し、MFC-1での最大引っ張り力は133g/mm²に増える。この場合のMFC-1の下面の温度は高々308℃である。従って、加工温度として考えている800℃まで上げた場合は、360g/mm²の引っ張り力がかかり、MFC-1を破損する可能性がある。このため、第2層の応力緩衝材があることが望ましい。

また、冷却水の出口温度は48.4℃である。圧損は、コルブルクの式による摩擦係数を用いると1.94気圧を得る。

表2 熱変位と熱応力の最大値

入熱条件		1.68MW/mm ²	5.0MW/mm ²
熱変位	横方向	32.9μm	103.2μm
	縦方向	18.8μm	59.3μm
MFC-1層	引張応力	-25~2g/mm ²	-90~8g/mm ²
W-30Cu層	ミゼス応力	4.61kg/mm ²	13.8kg/mm ²
Cu層	ミゼス応力	5.42kg/mm ²	16.2kg/mm ²

3. まとめ

以上の結果より、本設計によるビームストッパーは熱的に問題の無いことが確認できた。今後の課題として、CC材の選定や冷却系も含めて設計の詳細化と最適化、ビームストッパーの製作性の検討が、さらに設計精度確認やCC材の損傷影響と寿命の検討が挙げられる。そのため、BTA試験器の2MeVの陽子ビームでのモックアップ実験を検討している。

参考文献

- 1) M. Mizumoto, et al., ICENES' 93, Makuhari, p. 453 (1993).
- 2) M. Mizumoto et al., 第17回本研究会予稿集, p. 121 (1992).
- 3) J. Kusano, et al., 本研究会
- 4) D. Liska, private communication.
- 5) 宮能他, 日本原子力学会誌, 29巻, p. 855 (1993).
- 6) I. Smid, et al., JAERI-M 93-149 (1993).

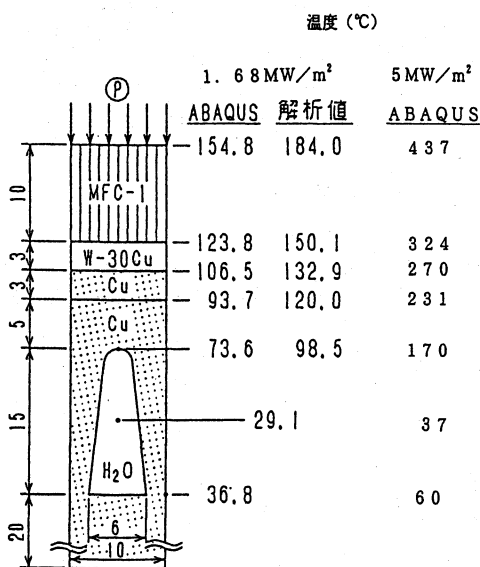


図2 主要点での温度の比較

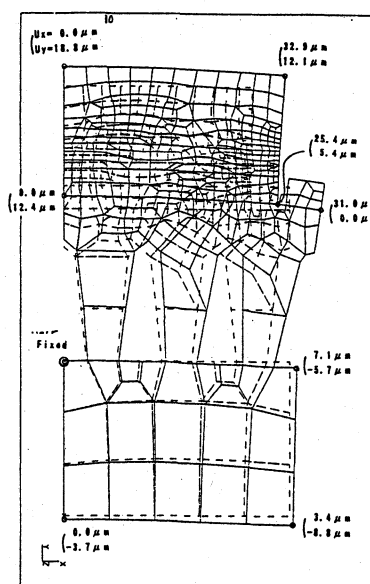


図3 入熱密度1.68MW/m²の時の熱変位