

PRELIMINARY MOCK-UP EXPERIMENT OF BTA BEAM STOPPER WITH 2 MEV PROTONS FROM RFQ AT JAERI

M. KAWAI, J. KUSANO\*, K HASEGAWA\*, H. OGURI\*, N. ITO\*, Y. TOUCHI\*\*,  
H. INO\*\*\*, H. KITAMURA\*\*\*\*, K. SATO, S. KURITA and M. MIZUMOTO\*

Toshiba Corporation

4-1 Ukishima-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi 210, Japan

ABSTRACT

The Preliminary mock-up experiments of beam stopper for 10 MeV proton linear accelerator BTA (Basic Technology Accelerator) pulse-operated with a peak current 100 mA and duty factor 10 % has been made by using 2 MeV proton beam from RFQ at JAERI in order to investigate a beam-stopper fabrication method and its thermal performance. The mockup sample is made of 12 pieces of tile of carbon fiber complex material and W-Cu alloy layers arrayed on a copper plate having water channel for heat removal. Temperatures distributions were measured with thermo-couples and a thermo image camera. The transient elevation of temperature on the surface of CC was observed to be about 100°C within 500 ns at beam bombarding with heat flux of 100 kW. One-dimensional calculations using analytic formulas of random flow and heat transfer was compared with the measurements: a general agreement is obtained for temperature in quasi-steady state off the beam.

原研RFQの2 MeV陽子ビームを用いたBTAビームストッパーのモックアップ予備実験

1. はじめに

原研にて、大強度陽子線形加速器開発<sup>(1-4)</sup>の一環として建設を予定している技術開発用加速装置は、加速エネルギー 10 MeV, ピーク電流100 mA、繰り返し周波数100Hz、パルス幅 1 msの条件でパルス運転される。そのビームストッパーは、ピークで1 MWの熱負荷があり、その除熱と中性子生成の抑制を考慮して、新素材の炭素繊維複合材 (CC材) / W-Cu合金 / 銅の多重層構造となる予定である<sup>(5)</sup>。その製作性と熱設計の基礎的な特性を調べるため、R&Dの2 MeV陽子ビーム加速装置RFQを用いて予備的なモックアップ実験を行った。以下、その実験概要と結果ならびに1次元解析モデルによる解析結果を示す。

2. 実験概要

ビームストッパー模擬試験体は、内側に幅30 mm × 高さ25 mmの水冷却チャンネルを持つ厚さが7.5 mm、サイズ40mm × 120mmの銅板上に、7mm厚の1次元

CC材 (東芝製 TASC-1) と3 mm厚のW-Cu傾斜機能合金を接合した20mm × 20mmサイズのタイルを12枚ならべて作った。これは、冷却チャンネルの蓋と構造支持を兼ねて10 mm厚のステンレス鋼の板と冷却水用のステンレス製パイプが取り付けられた。これらの材料の接合は鋳付けによった。

Fig. 1に実験配置を示す。模擬試験体はビーム診断箱中、RFQ出口から1.1 m後方ビーム軸上にビームに対して45度傾けて置かれた。試験体の表面温度は、ビーム診断箱側面覗き窓に取り付けた赤外線カメラ (7ピコクス社製 TVS-2500TE) によりCC材表

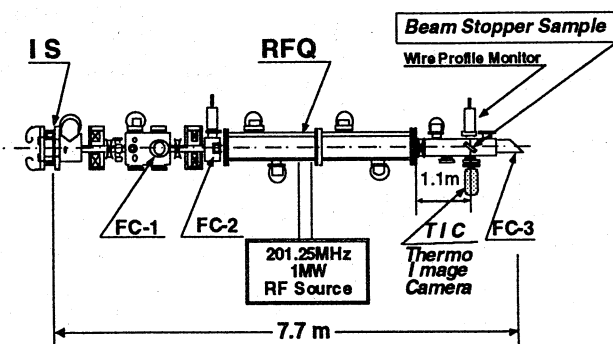


Fig. 1 実験配置図

\* Japan Atomic Energy Research Institute.  
\*\* Sumitomo Heavy Industries, Ltd.  
\*\*\* Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.  
\*\*\*\* Mitsubishi Electric Corporation.

面の2次元的な分布を、また、試験体の側面に取り付けた5個の熱電対によりCC材深さ方向の温度分布を測定した。陽子ビームの入射条件は、電流値52 mA、パルス幅0.5 msあるいは1 msであり、Dutyは0.25%~1.25%である。上記実験条件により、CC材表面への入熱密度はビーム中心で最大約40 MW/m<sup>2</sup>と推定される。これは、BTAビームストッパーの50 MW/m<sup>2</sup>に近い。また、冷却水の流量については、3, 4.5, 6 l/minの3種類を取った。

また、この測定とは独立に模擬試験体位置にワイアー型プロファイルモニターを設置して模擬試験体に入射するビームプロファイルを測定した。

### 3. 実験結果

#### (1) 過渡的温度分布

赤外線カメラの視点を試験体中心軸のみに高速移動させて繰り返し観測し(いわゆるラインスキャンモードにより)、その軸に沿った位置の温度の時間変化を測定した。結果をFig. 2に示す。丁度、高速回転するカメラのミラーがビーム入射と同期した場合に最高温度が観測される訳で、Fig. 2はそうしたデータが撮れたと思われるいくつかの熱画像のホットスポットでの温度を平均して得たものであり、横軸は、ビーム入射時刻を原点とした。図において、ビーム入射直後、CC材の表面温度は急激に上昇している。その上昇速度は、入射ビームのパルス幅や繰り返し数さらに冷却水の流量によらずほぼ同程度であり、0.5 ms内に約100°C上昇している。そしてパルス幅が0.5 ms以上のものではさらに温度が上がっている。次いで、ビームパルスが無くなると入熱量と冷却水流量で定まる準定常的な温度まで急降下しており、その後は非常に緩やかな温度降下を示

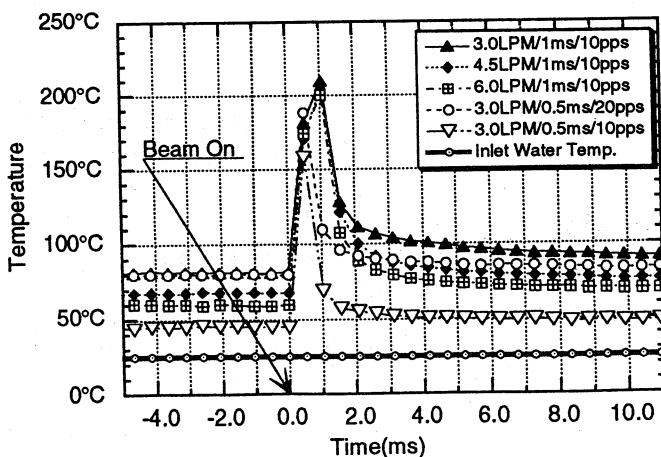


Fig. 2 ビーム入射直後の過渡的温度変化

している。かようにビームパルス入射直後の過渡的な温度変化は、入熱密度と材料の性質のみに決まるもので、系の冷却条件には依存しないことがわかる。

一方、後述の赤外線カメラでの2次元温度分布と熱電対での測定結果は、準定常的な時間範囲のものであり、冷却条件や入熱の総量(duty)に依存する。

#### (2) CC材表面の温度

Fig. 3には、CC材表面の代表的な位置〔試験体中心高さ右端で熱電対に近い位置〕での温度を、Dutyの関数として示す。パルス幅による影響を調べるため同じdutyのデータでもパルス幅0.5 msのものを左側、1 msのものを右側にプロットした。図においてパルス幅の影響は殆ど無く、温度がDutyに対してほぼ線形な変化をしていることがわかる。熱電対による結果も殆ど同じ結果を示している。図中の直線は、入熱密度をDutyで平均化して与えた定常の熱伝導問題として1次元乱流と熱伝導モデルによる計算式による結果である。入熱分布は、ワイアー型プロファイルモニターで測定した $\sigma_x = 14$  mm、 $\sigma_y = 20.6$  mmによるガウス分布を仮定した。また、冷却チャンネル壁の熱伝達率は、レイノルズ数Reが3,590~7,180と $10^4$ より小さく、Dittus-Boelterの適用範囲を越えているため、Gnielinskyの式

$$Nu = \frac{(f/2)(Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7(f/2)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$$

を用いた。ただし、Prはプラントル数である。また、管摩擦係数fは下記のBrasiusの式を用いた。

$$f = 0.079/Re^{0.25}$$

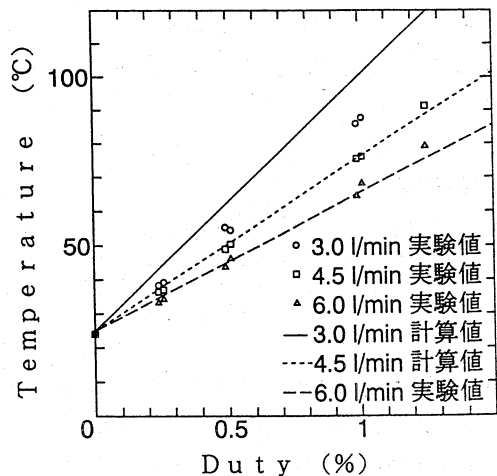


Fig. 3 CC材表面温度のDuty依存性

計算値は、流量が 4.5 l/minと6.0 l/minの場合に実験値と良い一致を示している。しかし、3.0 l/minの場合には、過大評価となっている。実験値を同じ Duty での温度の流量依存性を見た場合、温度は流量にほぼ線形な関係を示しているのに対して、計算値は4.5 l/minから3.0 l/minにかけてギャップが見られる。このことは、熱伝達の相関式について問題を残しているのかも知れない。

### (3) 温度の空間分布

赤外線カメラによりC C材表面の2次元温度分布を得た。それは、ビーム中心に相当する位置にホットスポットを示すものである。また、カメラから見て左側の側面もビームに曝されるため、C C材表面左端も高温になっている。この2次元温度分布から温度プロファイルを求め、ワイヤータイプのプロファイルモニターでの結果と比較し、温度が入射ビームの空間分布をどの程度に保っているかを調べた。

Fig. 4は、その結果である。温度プロファイルは、温度変化についてX-方向(ビーム軸方向)またはY-方向(ビーム軸に垂直方向)について積分して得たものである。また、入射直後の熱画像よりY-方向プロファイルをした。X-方向については、C C材が±14 mmしかないので温度プロファイルのピークは狭くなっている。プラス側で広がっているのは、試験体側面を見ていることと、熱電対の部分の覆いの影響が出たものである。

Y-方向については、温度プロファイルがビームプロファイルより広がりを示している。しかし、入射直後の温度プロファイルはビームプロファイルに極めて近い。このことは、1次元C C材と赤外線カメラによりビームプロファイルを実験的に得られることを示している。

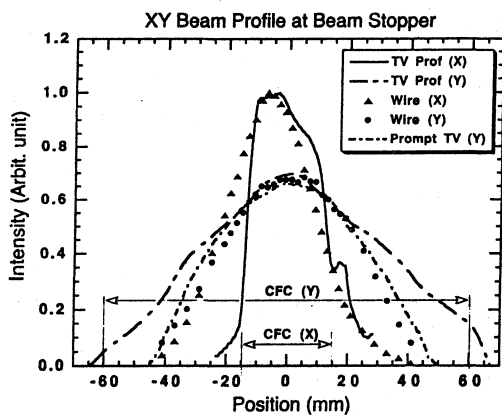


Fig. 4 温度プロファイルとビームプロファイル

### 4. まとめ

今回の実験により、低dutyであるがB T Aビームストッパーの入熱密度に近い条件(40 MW/m<sup>2</sup>)での温度変化についての情報が得られた。まず、陽子ビーム入射により表面温度は0.5 ms内で約100°C上昇し、ビームパルスが切れたところで急降下し、準定常的な値に安定することがわかった。2次元温度分布は準定常的な時間領域で測定したが、その温度はdutyにほぼ線形な関係を示し、パルス幅やパルスの繰り返し数によらないことがわかった。代表的な位置での温度について1次元熱伝導の式による計算値が概略実験値を再現し、比較的うまく記述できた。また、温度プロファイルについて、入射直後のものはワイヤー型プロファイルモニターの結果に非常に近いことが実験的に確かめられたが、時間とともに拡散による広がり見られた。このことは、準定常的な時間での分布を得るには時間依存の熱伝導問題を解く必要があることを示している。

なお、B T Aビームストッパーはduty 10%で使用される。こうした高い入熱では冷却水が核沸騰を起こす可能性があり、実験的に確かめることが重要である。今後、より実規模に近い実験を行い、基礎的なデータ採取とともにビームストッパーとしての実証性を明らかにしたい。

### 参考文献

- 1) 草野譲一他, "原研B T Aの要素技術開発", 第19回リニアック技術研究会邦文集、JAERI-Conf 94-003, p. 69 (1994).
- 2) M. Mizumoto, et al., "High Intensity Proton Linear Accelerator for Nuclear Waste Transmutation," Proc. 7th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy System, 20-24 September 1993, Makuhari, p. 453 (1993).
- 3) K. Hasegawa, et al., "First Beam Test of the JAERI 2 MeV RFQ for BTA," Proc. 1994 International Linac Conf., August 21-26, 1994, Tsukuba, p. 113 (1994).
- 4) H. Oguri, et al., "A High Brightness Hydrogen Ion Source for the BTA at JAERI," *ibid.* p. 381 (1994).
- 5) 川合将義他, "原研B T Aの100 kW陽子ビームストッパーの設計," 第19回リニアック技術研究会邦文集、JAERI-Conf 94-003, p. 69 (1994).