

## J-PARC 3 GeV シンクロトロン用荷電変換foil温度分布計算

倉持勝也<sup>A)</sup>、金正倫計<sup>A)</sup>、入江吉郎<sup>B)</sup>、菅井勲<sup>B)</sup>、五十嵐進<sup>B)</sup>、  
荒木田是夫<sup>B)</sup>、武田泰弘<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 日本原子力研究所 東海研究所 大強度陽子加速器施設開発センター  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

<sup>B)</sup> 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

### はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC) 3 GeV シンクロトロン(3 GeV-RCS)では、3種類の荷電変換foilを使用する。1つは、リニアックで加速されたH<sup>+</sup>ビームをH<sup>+</sup>に荷電変換し、3 GeV-RCSへ入射するためのfoil(ファーストfoil)、ファーストfoilでH<sup>+</sup>ではなくH<sup>0</sup>に変換されたビームをH<sup>+</sup>ビームに変換するfoil(セカンドfoil)、及びファーストfoilで変換されずにHのまま残ったものをH<sup>+</sup>ビームに変換するfoil(サードfoil)である。セカンドfoil及びサードfoilでH<sup>+</sup>に変換されたビームは下流にあるH<sup>0</sup>ビームダンプに導かれる[1]。

これらのfoilは用途の違いにより必要とされる膜厚や材質にも違いがある。それぞれのfoilの温度上昇(温度分布)を解析計算にて知ることにより、荷電変換foilシステムを構築するための材料、膜厚、及びfoilの寿命の参考とする。今回はファーストfoil、及びサードfoilについて検討を行った。算出には計算コードANSYSを使用し、入力条件として、ACCSIMの出力を利用した。

## 1 解析モデル

### 1.1 モデル

foilの温度計算に使用したモデルを表1に示す。

メッシュサイズはACCSIM[2][3]での粒子分布データを計算コードANSYS[4]の入力データとしているため、ACCSIMのメッシュサイズに合わせている。

表1：計算モデル

	形状 (横*縦*厚さ)	メッシュ分割 (横*縦)
モデル1	26mm*12.8mm*1.5 μm	65*32
モデル2	36mm*32mm*1.5 μm	50*50

### 1.2 物性値

ファーストfoilは荷電変換後のビームの質が重要となるため、また、周回ビームが何度もfoilを通過するために、密度が小さく昇華温度の高い炭素をfoil材料として利用する。実際使用される炭素foilは真空蒸着等で製作されるため、正確な物性値が明らかでないため、今回はダイヤモンド、及びグラファイトの2種類で計算を行った。

本計算に使用したファースト及びサードfoilの材料物性値を表2及び表3にそれぞれ示す。

表2：物性値表1 [5][6]

	ダイヤモンド	グラファイト
密度 g/cm <sup>3</sup>	3.51	2.25
比熱 J/g・K	298K	0.51
	500K	1.13
	700K	1.48
熱伝導率 W/m・K	800K	1.63
	1100K	1.88
	3550K	4.61
輻射率	100K	5450
	300K	129
	400K	936
	500K	106
	3000K	31
	0.2,及び0.8	0.2,及び0.8

表3：物性値表2

	アルミニウム	銅
密度 g/cm <sup>3</sup>	2.70	8.93
比熱 J/g・K	9.17	3.85
熱伝導率 W/m・K	100K	240
	300K	233
	700K	92
輻射率	100K	395
	300K	381
	700K	354
	0.2	0.2

### 1.3 解析条件

今回の計算に使用した条件を以下に示す

全ての計算において、foilの初期温度、及び輻射の参照温度は293Kである。輻射の参照温度とは、面間で受け取られなかった輻射エネルギーを吸収するための温度である。

#### (1) 入熱時間条件

図1に入射ビームのパターンを示す。入熱時間条件は、この入射パターンを使用した。

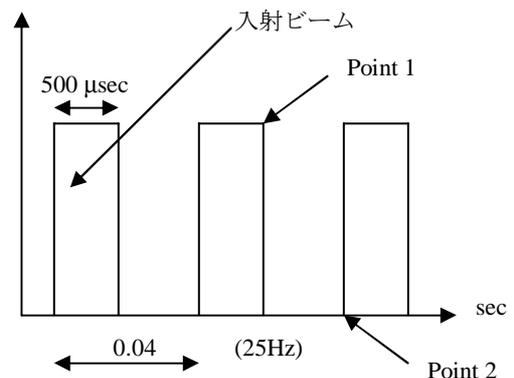


図1：入射ビームのパターン形状

(2) ファーストフォイル

ファーストフォイルは表1に示した両計算モデルで計算を行った。モデル1では、図2に示す ACCSIM の粒子分布データを入力値とし、ダイヤモンド、及びグラファイトの両方で輻射率0.2と0.8の2種類でそれぞれのフォイルの温度分布を計算した。フォイルの輻射率に関しては、明らかなデータがないので、輻射率の高低で温度上昇や分布の違いを評価するために、0.2と0.8の値を使用した。また入射パンプ立ち下り時間 50 μsec, 100 μsec, 及び 200 μsec の3種類についてモデル2によりフォイルの温度分布を計算した。

ファーストフォイルの入熱条件として、陽子がフォイルを通過した際のエネルギーロス (energy deposition) の値を用いた。400MeVの陽子1個が 1.5 μm の炭素フォイルを通過する際のエネルギーロスは 819eV である[7]。

(3) サードフォイル

サードフォイルはモデル2で計算を行った。フォイルの材質としてアルミニウム、及び銅の2種類を使用し、輻射率は 0.2 とした。入熱条件はファーストフォイルの破損による入射 H のフルビームの通過、及び入射パンプ磁場のミストリガによる入射 H ビームの10%通過の2種類を想定し計算を行った。フォイルの膜厚は 10 μm, 50 μm, 及び 100 μm の3種類について検討した。

サードフォイルの入熱条件もファーストフォイル同様、陽子のエネルギーロスとした。10 μm の銅のフォイルを通過する 400MeV の陽子のエネルギーロスは 18650eV であり、10 μm のアルミニウムでは 6490eV である。

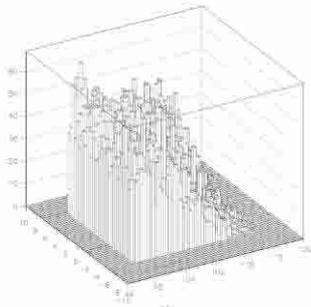


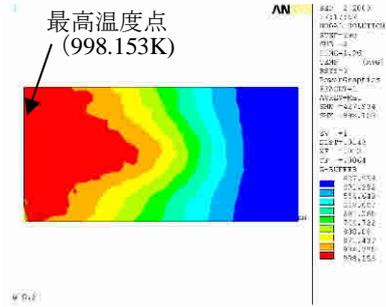
図2: ACCSIM 粒子分布 (モデル1)  
粒子数: 10000 個, x 軸: フォイル位置  
y 軸: フォイル位置, z 軸: 粒子の数

2 温度分布計算結果評価

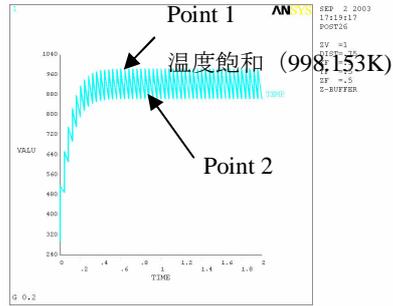
2.1 ファーストフォイル

代表的な温度分布図、及び最高温度推移グラフを図3、及び図4に示し、全計算ケースの計算結果を表4、及び表5に示す。

今回の計算結果からフォイル先端部に高温部が集中することがわかった。これがフォイル周辺部が内側にカールする等の熱変形の原因であると考えられる。

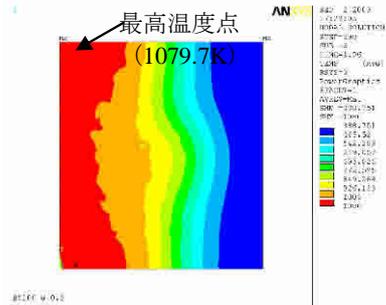


(1) ビーム通過直後の温度分布  
材質: グラファイト, 輻射率: 0.2

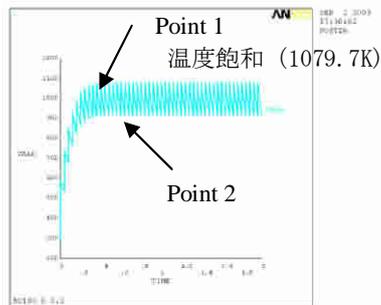


(2) 最高温度推移 (K)  
材質: グラファイト, 輻射率: 0.2

図3: モデル1によるファーストフォイルの温度分布及び最高温度推移グラフ



(1) ビーム通過直後の温度分布  
材質: グラファイト, 輻射率: 0.2



(2) 最高温度推移 (K)  
材質: グラファイト, 輻射率: 0.2

図4: モデル2によるファーストフォイルの温度分布及び最高温度推移グラフ

表 4 : モデル 1 計算結果

ケース名	Point 1 最高温度 (K)	Point 2 最高温度 (K)
グラファイト 輻射率:0.2	998.15	865.02
:0.8	748.37	593.63
ダイヤモンド 輻射率:0.2	930.23	850.47
:0.8	696.20	598.45

表 5 : モデル 2 計算結果

ケース名	Point 1 最高温度 (K)	Point 2 最高温度 (K)
$T_b=50 \mu\text{sec}$ , $\epsilon_g=0.2$	1069.0	914.0
$T_b=100 \mu\text{sec}$ , $\epsilon_g=0.2$	1079.7	917.73
$T_b=100 \mu\text{sec}$ , $\epsilon_g=0.8$	811.87	627.13
$T_b=200 \mu\text{sec}$ , $\epsilon_g=0.2$	1541.2	1137.9
$T_b=200 \mu\text{sec}$ , $\epsilon_g=0.8$	1225.5	753.0
$T_b=100 \mu\text{sec}$ , $\epsilon_d=0.2$	1014.2	916.13
$T_b=100 \mu\text{sec}$ , $\epsilon_d=0.8$	756.49	638.77
$T_b=200 \mu\text{sec}$ , $\epsilon_d=0.2$	1448.6	1176.1
$T_b=200 \mu\text{sec}$ , $\epsilon_d=0.8$	1089.8	799.72

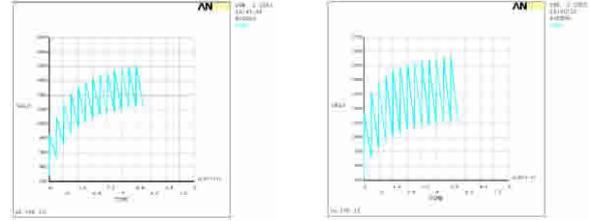
$T_b$ :バンパ磁場の立下り時間,  $\epsilon_g$ :グラファイトの輻射率  
 $\epsilon_d$ :ダイヤモンドの輻射率

入射バンパの磁場立下り時間 200  $\mu\text{sec}$  と 100  $\mu\text{sec}$  でのフォイル温度を比較すると, 200  $\mu\text{sec}$  の場合, 100  $\mu\text{sec}$  の場合の約 1.5 倍の温度上昇が見られる. 一方, 入射バンパ磁場の立下り時間が, 100  $\mu\text{sec}$  と 50  $\mu\text{sec}$  の場合を比較すると, フォイルの温度上昇には大差が見られない. 3 種類の入射バンパ磁場立下り時間において, フォイルを通過する粒子数がそれぞれ約 200000 個でほぼ同数であるが, 200  $\mu\text{sec}$  時では通過する粒子がフォイル先端部に集中していることが原因で, 最高温度に大きな差が生じたと考えられる. このことから, バンパ磁場が 100  $\mu\text{sec}$  程度で落ちれば, 周回ビームへの磁場影響が小さく, フォイルの温度上昇を抑制することが可能である. 以上のことより, 入射バンパ磁場の立下り時間は 100  $\mu\text{sec}$  以下が必要である.

## 2.2 サードフォイル

サードフォイルで変換される陽子量は, ファーストフォイルが正常に機能している限り, 0.1 ワット以下である. しかし, このフォイルが破損した場合には, 全 H ビームがサードフォイルを通過することになる. また, もし 4 台のペイントバンパ電磁石励磁のタイミングが何らかの故障で同期しなかった場合, 1 ターン後のビームがサードフォイルを直撃することがある. これらのことを考慮して, フルビーム及び, フルビームの 10% がフォイルを通過した場合のフォイルの温度上昇を計算した. 180MeV フルビーム 1 ショット通過時の最高温度推移グラフを図 5 に, 各条件でのビーム 1 ショット通過時の最高温度を表 6 に示す. 今回の入熱条件では, 単位体積当たりの入熱量が同じとなるので, 膜厚によらず温度上昇も同じになる.

フルビーム 1 ショット通過時には, 銅, 及びアルミニウム両方で高温になることがわかり, フォイルの破損が心配される結果となった. 以上のことから, 事故時を想定し, サードフォイルも簡便に交換可能なシステムが必要であると考えられる.



(1) 最高温度推移 (K)

(2) 最高温度推移 (K)

材質 : Al

材質 : Cu

図 5 : 最高温度推移グラフ

入射ビーム : 180MeV フルビーム 1 ショット

膜厚 10  $\mu\text{m}$ , 輻射率 : 0.2

表 6 : サードフォイル温度分布計算結果

エネルギー 通過ビーム	物質	膜厚 10 $\mu\text{m}$	膜厚 50 $\mu\text{m}$	膜厚 100 $\mu\text{m}$
180MeV, 10%	Al	349.394	349.394	349.394
180MeV, full	Al	850.722	850.786	850.794
400MeV, 10%	Al	328.757	328.757	328.757
400MeV, full	Al	646.572	646.595	646.598
180MeV, 10%	Cu	408.655	408.655	408.655
180MeV, full	Cu	1435.0	1436.0	1436.0
400MeV, 10%	Cu	367.16	367.16	367.16
400MeV, full	Cu	1026.0	1026.0	1026.0

## 3 結言

大強度陽子加速器施設 3 GeV-RCS で使用するフォイルの温度分布計算を行った. 計算の結果, 入射バンパ磁場の立下り時間が 200  $\mu\text{sec}$  と 100  $\mu\text{sec}$  では, 約 1.5 倍の温度上昇があり, 100  $\mu\text{sec}$  と 50  $\mu\text{sec}$  では大差がないことがわかった. ファーストフォイルの温度は入射バンパ磁場の立下り時間に依存する. 計算の結果, バンパ磁場の立下り時間を 100  $\mu\text{sec}$  で設計を進める方針である.

サードフォイルについては銅, アルミ両材料においてフルビーム通過時に, 短時間でフォイルが破損する場合が考えられる. よって, フォイル交換機能を取り入れることとした. また, 膜厚は機械的強度で決める必要があるので今後, 構造解析計算を行う予定である.

## 参考文献

- [1] JAERI-Tech 2003-044 p 101
- [2] J F Janni : Technical Report No. AFWL-TR-65-150
- [3] F W Jones, Accsim Reference Guide, Version 3.5, June 1999, TRIUMF
- [4] ANSYS 伝熱解析セミナーノート
- [5] 無機化学全書 X-2 丸善 昭和 51 年
- [6] 薄膜ハンドブック 日本学術振興会, 薄膜第 131 委員会編, オーム社, 1983 年
- [7] JF janni, AFWL-TR-65-150