

J-PARC 3 GeV シンクロトロン用荷電変換フォイル温度分布計算

倉持勝也^{A)}、金正倫計^{A)}、入江吉郎^{B)}、菅井勲^{B)}、五十嵐進^{B)}、
荒木田是夫^{B)}、武田泰弘^{B)}

^{A)} 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

^{B)} 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

材料物性値を表 2 及び表 3 にそれぞれ示す。

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 種類の荷電変換フォイルを使用する。1 つは、リニアックで加速された H⁺ ビームを H⁺ に荷電変換し、3 GeV-RCS へ入射するためのフォイル (ファーストフォイル)、ファーストフォイルで H⁺ ではなく H⁰ に変換されたビームを H⁺ ビームに変換するフォイル (セカンドフォイル)、及びファーストフォイルで変換されずに H のまま残ったものを H⁺ ビームに変換するフォイル (サードフォイル) である。セカンドフォイル及びサードフォイルで H⁺ に変換されたビームは下流にある H⁰ ビームダンプに導かれる[1]。

これらのフォイル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。それぞれのフォイルの温度上昇 (温度分布) を解析計算にて知ることにより、荷電変換フォイルシステムを構築するための材料、膜厚、及びフォイルの寿命の参考とする。今回はファーストフォイル、及びサードフォイル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

フォイル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]での粒子分布データを計算コード ANSYS[3]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

ファーストフォイル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フォイルを通過するために、密度が小さく昇華温度の高い炭素をフォイル材料として利用する。実際使用される炭素フォイル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ので、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フォイルの

表 2 : 物性値表 1 [4][5]

	ダイヤモンド	グラファイト
密度 g/cm ³	3.51	2.25
比熱 J/g・K	298K 0.51	373K 0.75
	500K 1.13	700K 1.48
	800K 1.63	1255K 1.87
	1100K 1.88	3550K 4.61
熱伝導率 W/m・K	100K 5450	300K 129
	400K 936	500K 106
		3000K 31
輻射率	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 ³	2.70	8.93
比熱 J/g・K	9.17	3.85
熱伝導率 W/m・K	100K 240	100K 395
	300K 233	300K 381
	700K 92	700K 354
輻射率	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、フォイルの初期温度、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。

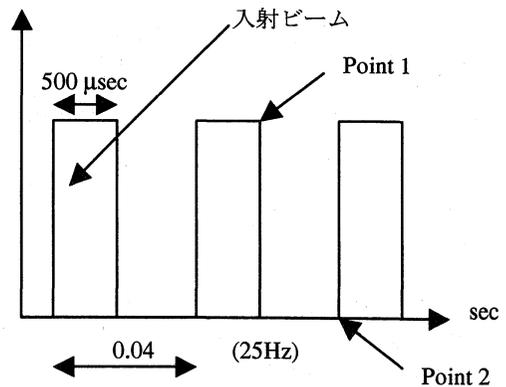


図 1 : 入射ビームのパターン形状

(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。両モデル共、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をするために、0.2と0.8の値を使用した。また入射バンプ立ち下り時間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) と電子のロス (electron deposition) の和の値を用いた。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[6]。入射バンプ立ち下り時間100 μsec 時のACCSIMの粒子分布データを図2に示す。ビーム入射点における入熱量は1.7W/cm²、周辺部は3.4W/cm²である。

(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、及び入射バンプ磁場のミスリガによる入射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[6]。

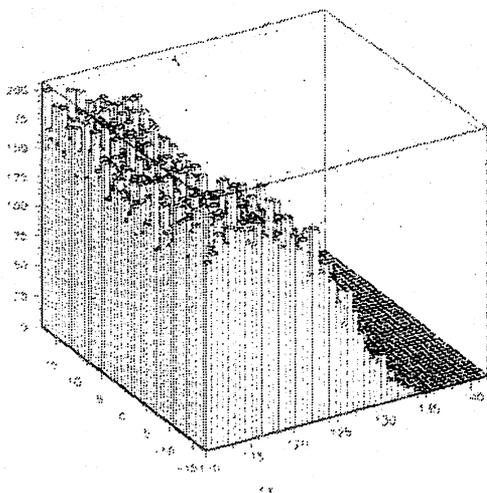


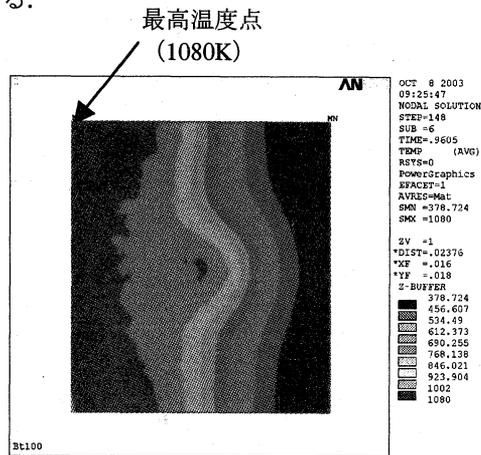
図2: ACCSIM 粒子分布 (モデル2)
粒子数: 10000 個, x 軸: フォイル位置
y 軸: フォイル位置, z 軸: 粒子の数

2 温度分布計算結果評価

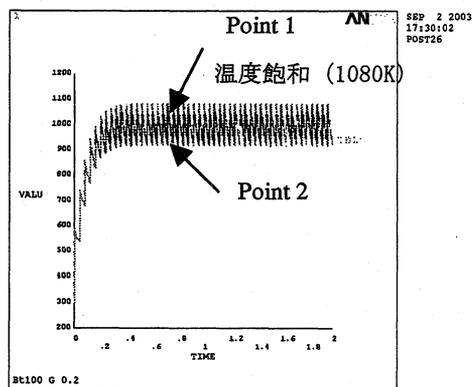
2.1 ファーストフォイル

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。

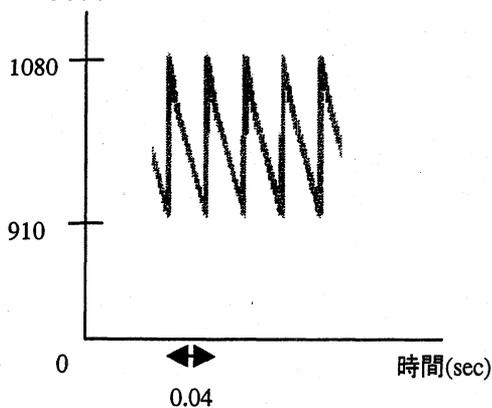


(1) ビーム通過直後の温度分布
材質: グラファイト, 輻射率: 0.2



(2) 最高温度推移 (K)

温度(K) 材質: グラファイト, 輻射率: 0.2



(3) 上記最高温度推移拡大図

図3: 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	865
:0.8	748	594
ダイヤモンド 輻射率:0.2	930	850
:0.8	696	598

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	914
$T_b=100 \mu\text{sec}, \epsilon_g=0.2$	1080	918
$T_b=100 \mu\text{sec}, \epsilon_g=0.8$	812	627
$T_b=200 \mu\text{sec}, \epsilon_g=0.2$	1541	1138
$T_b=200 \mu\text{sec}, \epsilon_g=0.8$	1226	753
$T_b=100 \mu\text{sec}, \epsilon_d=0.2$	1014	916
$T_b=100 \mu\text{sec}, \epsilon_d=0.8$	756	639
$T_b=200 \mu\text{sec}, \epsilon_d=0.2$	1449	1176
$T_b=200 \mu\text{sec}, \epsilon_d=0.8$	1090	800

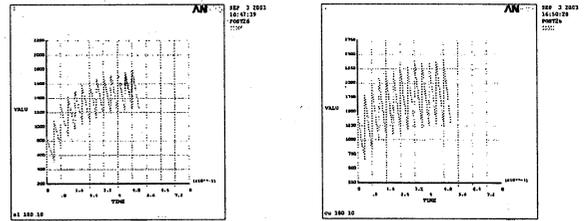
T_b :バンプ磁場の立下り時間, ϵ_g :グラファイトの輻射率
 ϵ_d :ダイヤモンドの輻射率

入射バンプの磁場立下り時間 200 μsec と 100 μsec でのフォイル温度を比較すると, 200 μsec の場合, 100 μsec の場合の約 1.5 倍の温度上昇が見られる. 一方, 入射バンプ磁場の立下り時間が, 100 μsec と 50 μsec 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 種類の入射バンプ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投入粒子数の約 20 倍でほぼ同数であるが, 200 μsec 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, バンプ磁場が 100 μsec 程度で立下がれば, 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, 入射バンプ磁場の立下り時間は 100 μsec 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 台のペイントバンプ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 4 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) 材質: Al
 (2) 最高温度推移 (K) 材質: Cu

図 4 : 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 μm , 輻射率 : 0.2

表 6 : サードフォイル温度分布計算結果 (K)

エネルギー 通過ビーム	物質	膜厚 10 μm	膜厚 50 μm	膜厚 100 μm
180MeV, 10%	Al	349	349	349
180MeV, full	Al	851	851	851
400MeV, 10%	Al	329	329	329
400MeV, full	Al	647	647	647
180MeV, 10%	Cu	409	409	409
180MeV, full	Cu	1435	1436	1436
400MeV, 10%	Cu	367	367	367
400MeV, full	Cu	1026	1026	1026

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, 入射バンプ磁場の立下り時間が 200 μsec と 100 μsec では, 約 1.5 倍の温度上昇があり, 100 μsec と 50 μsec 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プ磁場の立下り時間に依存する. 計算の結果, バンプ磁場の立下り時間を 100 μsec 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, 短期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ため今後, 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] F W Jones, Accsim Reference Guide, Version 3.5, June 1999, TRIUMF
- [3] ANSYS 伝熱解析セミナーノート
- [4] 無機化学全書 X-2 丸善 昭和 51 年
- [5] 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
- [6] J F Janni : Technical Report No. AFWL-TR-65-150