

7. HD ターゲット

高エネルギー加速器研究機構

高 橋 仁

目 次

HDターゲット

1	はじめに	7-1
2	要求項目	7-1
3	固定標的	7-2
3.1	50 kW標的	7-2
3.2	95 kW標的	7-4
4	回転標的.....	7-8
4.1	冷却効率の測定	7-11
4.2	気体軸受の開発	7-12
4.3	回転実証試験	7-13
4.4	変位計の開発	7-14
5	終わりに.....	7-16
	参考文献	7-16

HD ターゲット

1 はじめに

前講義までで、J-PARCハドロン実験施設における中性二次ビームライン [1] と荷電二次ビームライン [2] の設計の詳細が説明された。本講義では、それら二次ビームの線源である生成標的について、現状と将来へ向けた取り組みを紹介する。なお、本テキストは、筆者による過去のOHO講義『二次粒子生成標的と二次ビームライン』のテキスト [3] から、標的に関するものを抜き出し、いくつか新しいトピックスを追加したものである。重複する内容が多いが、あらかじめご了承ください。

2 要求項目

前講義のハドロン荷電二次ビームラインの話 [2] の中で何回か、二次ビームの線源となる生成標的と一次ビームに対する要求が出てきた。まとめると次の3点である。

1. 二次粒子ビームの純度を上げるため、一次ビームの鉛直方向の幅はなるべく小さい方が良い。
2. 二次粒子ビームの強度と純度を上げるため、標的の密度はなるべく高い方が良い。
3. 二次ビームの運動量分解能を良くするため、1次ビームの水平方向の幅はなるべく小さい方が良い。
4. 特に低運動量の二次ビームの強度を稼ぐため、標的と1次ビームの水平方向の幅はなるべく小さい方が良い。

要は、全方位で出来る限り点線源に近づけよ、ということである。さらに、中性二次ビームライン KL [1] から、不要な中性子のバックグラウンドを低減させるために、やはり、なるべく点線源に近い方が望ましい、という要求がある。その結

果、ハドロン実験施設の生成標的における一次陽子ビームのサイズは、ガウス分布を想定して水平方向の標準偏差が $\sigma_x = 2.5 \text{ mm}$ 、鉛直方向が $\sigma_y = 1.0 \text{ mm}$ としている。

この点線源という要求が、ハドロン生成標的の最大の特徴であり、最も設計を難しくしている条件である。なぜならば、照射する一次陽子ビームのサイズを小さくすれば、それだけ標的が受けるエネルギー密度が高くなるからである。大強度加速器施設において、標的など直接ビームが照射される機器の健全性を保つためには、まずエネルギー密度を下げるのが定石であるが、ハドロン標的に対してはそれが許されない。比較を挙げると、ニュートリノ実験施設の生成標的における一次陽子ビームのサイズは $\sigma_x = \sigma_y = 4 \text{ mm}$ 、中性子実験施設の水銀標的では $\sigma_x = 39 \text{ mm}$ 、 $\sigma_y = 18 \text{ mm}$ である。2022年の時点で、中性子施設とニュートリノ施設は600 kW以上の陽子ビーム強度でユーザー利用運転を行っているのに対し、ハドロン実験施設は約65 kWとパワーでは1桁小さいが、エネルギー密度で比べるとほぼ同等かそれ以上である。さらに、標的の密度まで考慮すると、ニュートリノ施設の黒鉛 (密度 $\rho = 1.8 \text{ g/cm}^3$)、中性子施設の水銀 ($\rho = 13.5 \text{ g/cm}^3$) に対し、ハドロンは金 ($\rho = 19.3 \text{ g/cm}^3$) であるから、標的での発熱密度は、ハドロン標的が現状でもJ-PARC内で最高となる。

大強度加速期施設の生成標的として一般に要求される項目には、当然、

- 放射線的、化学的に安定、安全であること、
- 大強度ビームに耐えられる冷却効率を持つこと、

があるが、それ以外に大事な項目として、

- 高い残留放射能によるメンテナンス時の作業被曝を低減すること、

がある。ビーム照射後の標的本体は極度に放射化している (もし直接抱き抱えたら数分で致死量の放射線を浴びるレベル) ため、普段は分厚い遮蔽

体に囲まれており、周辺機器のメンテナンスの際の空間線量率を十分低く保つようになっている。さらに、標的の交換など、標的本体に触る必要がある時は、全て遠隔操作で標的の設置、取り出し等が可能であるように設計されている。

3 固定標的

前節で述べたような要求項目を満たすため、ハドロン実験施設では、これまで主に白金もしくは金を生成標的の材質として採用してきた。もともと 750 kW 対応の標的としてニッケル製回転標的を開発していたが、その際のビームロス率は、750 kW フルビーム時の放射線遮蔽の制限から 30% であった。しかし、遅い取り出しでは一次陽子ビーム強度をすぐにそこまで上げるのが困難であるという状況の中、二次ビーム強度を出来るだけ稼ぎたいという要求があり、ニッケルよりも密度の高い白金、金に変更することでビームロスを約 50% に上げることにしたのである。

Table 1 に、ニッケル回転標的以降のハドロン標的の遍歴をまとめた。ビーム強度が数 kW 程度までの初期の頃は非常に単純な自然空冷の白金標的が使われたが、その後は、白金もしくは金の標的本体に銅ブロックを接合し、その銅ブロックに冷却水配管を埋め込んで水冷するという、間接水冷方式の標的となった。最も密度の高い白金から金へ材質を変更した理由は、金の方が熱伝導が良いことと、比較的熱膨張係数が銅に近いことである。特に熱膨張係数が問題になるのは、異材同士の接合では両者の膨張係数の違いから大きなせん断応力が生じるためである。参考のために、いくつかの材料について代表的な物性値を Table 2 に載せる。

3.1 50 kW 標的

2013 年の放射性物質漏洩事故の後に設置された標的 [4,5] の断面図と写真を Fig. 1 に示す。スパルサイクルが 6 秒の場合に受け入れ可能な最大ビー

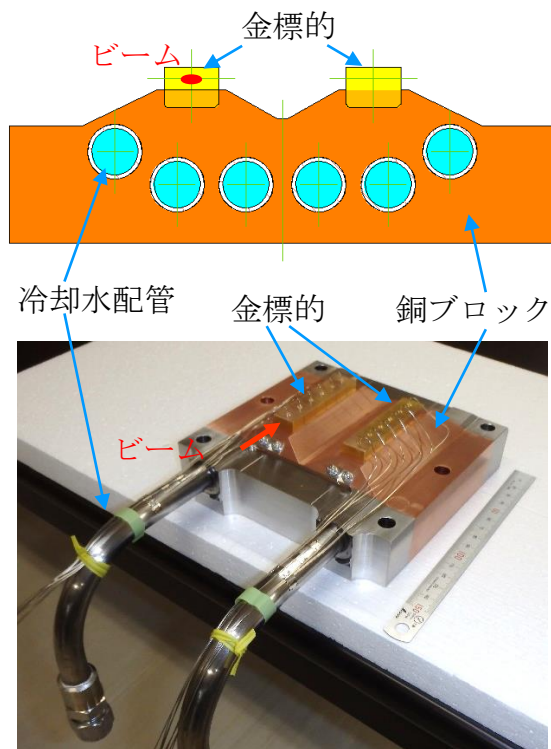


Fig. 1 50 kW 標的の断面図と写真。

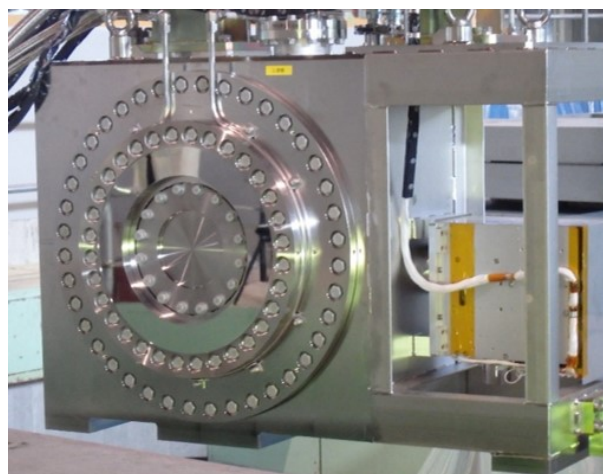


Fig. 2 50 kW 標的を収納しているステンレス製気密容器の写真。

Table 1 過去のハドロン生成標的の履歴。

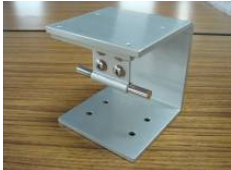

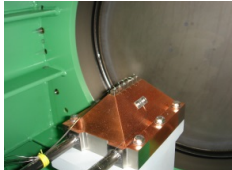
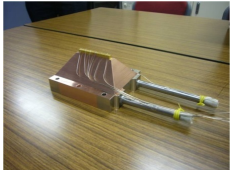
期間	2009年10月 ~2010年3月	2010年10月 ~2010年11月	2012年1月 ~2012年7月	2012年12月 ~2013年5月
ビーム強度	3 kW	5 kW	10 kW	24 kW
材質	白金 (60 mm)	白金 (60 mm)	白金 (60 mm)	金 (66 mm)
冷却方法	自然空冷	自然空冷	間接水冷	間接水冷
外観				

Table 2 金属の物性値。

	白金 Pt	金 Au	ニッケル Ni	銅 Cu	タングステン W	ベリリウム Be	チタン Ti
原子量	195	197	58.69	63.55	183.84	9.012	47.867
密度 (g/cm ³)	21.45	19.36	8.902	8.961	9.25	1.85	4.506
比熱 (J/g/K)	0.136	0.128	0.439	0.385	0.14	1.664	0.52
熱伝導率 (W/m/K)	71.6	318	90.9	401	173	200	21.9
融点 (°C)	1768	1064	1455	1085	3422	1287	1668
沸点 (°C)	3825	2856	2913	2562	5555	2469	3287
ヤング率 (GPa)	163	79	200	115	411	287	116
熱膨張係数 (10 ⁶ /K)	9.37	14.2	13.4	17.9	4.5	11.3	8.6
相互作用長 (cm)	8.844	10.14	15.18	15.06	9.95	42.10	27.80

ム強度は 50 kW である。標的本体の材質は金で、冷却水配管を埋め込んだ無酸素銅ブロックを接合して冷やす間接水冷方式である。冷却水配管は外径 15 mm、厚さ 1 mm のステンレス鋼 (SUS316L) 製のシームレス管である。金と銅、ステンレス鋼の接合には、HIP (Hot Isostatic Pressing) による拡散接合を用いている。材料の構成は、2013 年まで使用していた一つ前の標的と同じであるが、最大の違いは、冷却効率を上げるために、金本体から冷却水配管までの距離を近づけたことである。また、このような構成の標的の場合、最も可能性の高い壊れ方が、金と銅との接合が剥がれて冷却能力が失われることであるので、一気に剥がれ落ちることをなるべく防止するために金の一部を銅に埋め込む形とした。金の大きさは、高さ 11 mm (そのうち銅の外に剥き出しの部分が 6 mm)、幅 15 mm で、水平、鉛直方向共に、入射ビームの $\pm 3\sigma$ の範囲をカバーする。総長は 66 mm で、熱応力緩和のためビーム方向に 6 分割されている。温度監視のため、6 分割された各々のピースに K 型シース熱電対が取り付けられている。標的は二山構造になっていて、熱疲労や放射線損傷により冷却効率が落ちるなどした場合には、備え付けられた水平駆動機構を用いて遠隔操作で標的を交換できるようにになっている。2013 年に発生した放射性物質漏洩事故の教訓から、万が一金が損傷して放射性物質を発生させてもそれを拡散させないように、標的本体はステンレス製の気密容器 (Fig. 2) の中に収められ、更に、その容器内にヘリウムガスを循環させて放射性物質濃度を測定することで、標的の健全性を常に監視している [4, 6, 7]。

この標的は、2014 年 9 月に設置、2015 年 4 月からビーム照射を開始して、2019 年 4 月までトラブル無く安定運転を続けた。Fig. 3 は、100 ms ごとに熱電対で測定している金の各ピースの温度のモニター画面である。この時はスパルサイクルが 5.52 秒であったが、約 2 秒間のビーム取り出し中に温度が上がり、その後の 3.52 秒で冷えていく様子が良く分かる。測定した最高温度を、一次ビーム強度を横軸としてプロットしたものが Fig. 4 で

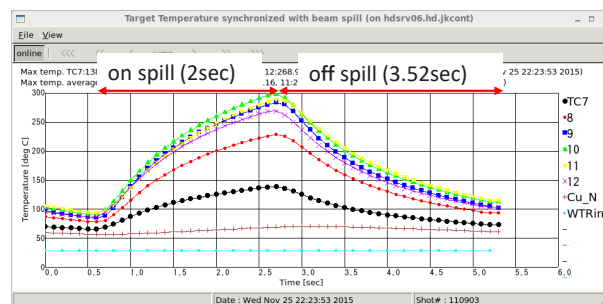


Fig. 3 50kW 標的の温度モニター画面。

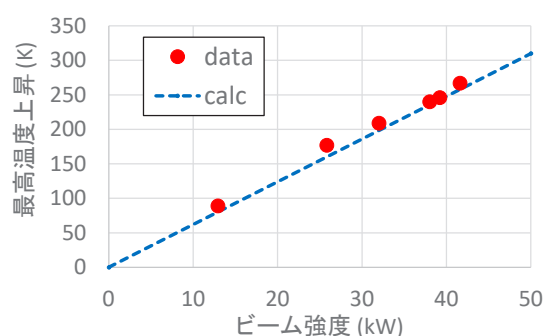


Fig. 4 50 kW 標的で実測した最高温度のビーム強度依存性。

ある。スパルサイクルが 6 秒から 5.52 秒になった結果設計上の最大ビーム強度は 53 kW になり (スパルサイクルが短くなると最大ビーム強度が増える理由は後述する)、一次陽子ビーム強度は 2018 年に最高 51 kW を達成した。

3.2 95 kW 標的

50 kW 標的での限界に近いビーム強度に達したため、ハドロン実験施設では、より高いビーム強度に耐えられる新しい標的を開発した [8-10]。Fig. 5 がその新しい標的の構造図である。後述する熱解析により、スパルサイクル 5.2 秒の時の最大ビーム強度は 95 kW となっている。基本的には 50 kW 標的の構造を踏襲しており、標的本体である金を、水配管を埋め込んだ銅ブロックで冷やす冷却方式は全く一緒である。しかし、より冷却効率を高くするため、金の下だけでなく上にも銅ブロックを接合している。ただ、そうすると金は上下とも拘束されて熱膨張の逃げ道が塞がれ、

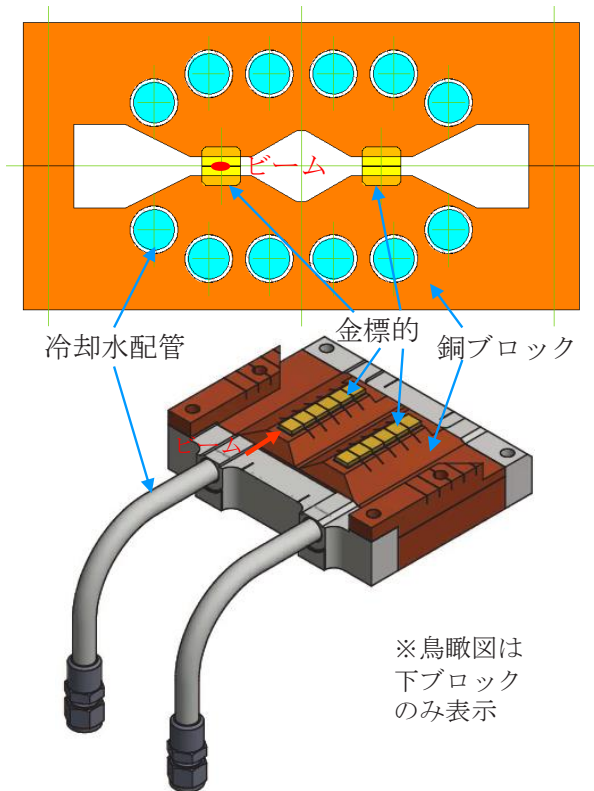


Fig. 5 95 kW 標的の断面図と鳥瞰図。

中心に大きな熱応力が発生してしまうため、ビーム方向だけでなく、上下にも金を分割する。熱計算より上下の金はそれぞれ約 0.1 mm 熱膨張すると予想されることから、分割した上下の金の間には 0.3 mm の隙間を設ける。

金本体の大きさも、二次ビーム収量と冷却効率の観点から最適化を施した。二次粒子の吸収の効果を考慮に入れて最適化した結果、新標的では金の横幅を 12 mm とした。また、銅から剥き出しの部分の金の高さは 50 kW 標的も 95 kW 標的も変わらず 6 mm であるが、銅への埋め込み深さは、50 kW 標的の 5 mm から 95 kW 標的では 2 mm へと小さくした。これは、金よりも銅の方が熱伝導率が良いため、発熱中心から冷却水までの熱の移動経路としてなるべく早く銅になった方が冷却効率が高くなるからである。ビーム方向の長さは、ビーム幅と同様二次ビームのバックグラウンド抑制の観点から制限されているため、50 kW 標的から変更なしで 66 mm である。

標的の熱強度評価は次のような手順で進められる。

1. モンテカルロシミュレーションによる発熱分布の計算
2. 有限要素法による温度と熱応力の算出
3. 許容応力との比較

高エネルギー粒子が厚い物質に入射する場合、二次粒子、三次粒子、…の生成、散乱、吸収により複雑な発熱分布となるため、粒子シミュレーションコードによる計算が必須である。有限要素法の計算には、発熱分布だけでなく、材料の物性値や冷却効率を入力する必要がある、また許容応力の設定には材料の強度のデータが必要であるので、それらが不明な場合はその測定も行わなければならない。例えば、ハドロン実験施設の金標的の場合は、特に高温における金の機械強度のデータが乏しかったため、実際の HIP 接合の際と同じ熱処理を加えた金の圧延材を用意し、それから JIS Z2241 13B 号試験片を作製して、最高 400 °C までの温度環境で引張試験を行った [9]。

この引張試験によって得られた金の応力-歪み曲線のデータと、モンテカルロコード MARS [11] により計算した発熱密度分布を用いて、有限要素計算コード ANSYS [12] で実際のスピル時間構造に合わせた過渡解析を行った。同じやり方で 50 kW 標的について計算した結果が Fig. 4 の計算値で、実測と良く一致している。想定したビーム条件は、エネルギー 30 GeV、平均強度 95 kW、取り出し時間 2 秒、繰り返し 5.2 秒、ビーム幅 $(\sigma_x, \sigma_y) = (2.5 \text{ mm}, 1.0 \text{ mm})$ である。その計算結果が Fig. 6 である。金本体の最高温度は 375 °C、接合部の温度は最高 264 °C となり、ミーゼス相当応力は、金本体と接合部でそれぞれ最大 8.1 MPa、9.0 MPa となった。

許容応力については、応力の種類に応じて次のように設定した。

$$\text{熱応力} : S_M \times 3$$

$$\text{低サイクル疲労} : 10^4 \text{ 疲労強度} / 2$$

$$\text{高サイクル疲労} : 10^7 \text{ 疲労強度} / 2$$

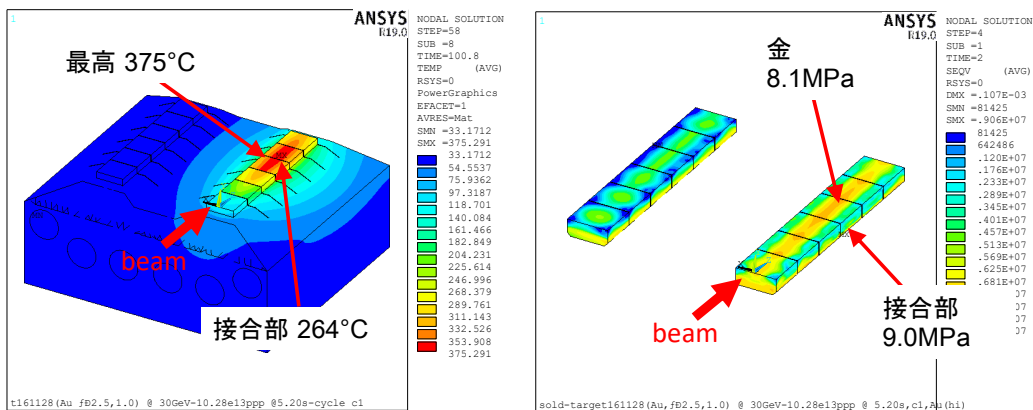


Fig. 6 ANSYS 計算によって得られた、95 kW 標的の温度分布 (左) とミーゼス相当応力分布 (右)。

ここで、低サイクル疲労は連続ビームの on/off の繰り返しを想定しており、平均 1 時間に 1 回インターロックでビーム運転が停止すると仮定したものである。高サイクル疲労は 1 スピル毎の繰り返しを想定しており、5.2 秒周期で 10^7 サイクルは約 1.5 万時間に相当する。設計応力強さ S_M は、JIS B8266 (圧力容器の構造-特定規格) における溶接管の基準を参考に、引張強度 $\times 0.85/3$ と 0.2% 耐力 $\times 0.85/1.5$ のいずれか小さい方とした。疲労強度は、過去の文献値では室温での金の疲労強度が 10^4 サイクルでおおよそ引張強度の 0.7 倍、 10^7 サイクルで引張強度の 0.4 倍になっていることから、 10^4 疲労強度として引張強度/2、 10^7 疲労強度として引張強度/3 とした。これらに用いる引張強度、0.2% 耐力には、温度毎に金の引張試験によって得られた値を使用する。

ANSYS 計算の結果をもとに、応力の種類ごとに評価した結果を Table 3 にまとめた。疲労に対しては、一回の熱サイクルにおける応力の振幅と疲労強度とを比較するが、同じ振幅でも平均応力によって強度が異なるため、平均応力に応じた補正をかけたものが等価応力振幅である。応力の大きさだけで見ると接合部がもっとも大きいのが、金本体のほうが温度が高い分だけ許容応力が小さくなるため、最大許容ビーム強度は金本体の高サイクル疲労によって制限される結果となった。

以上のような熱強度計算により、新しい間接水冷標的は十分な安全率をもって 95 kW の一次陽

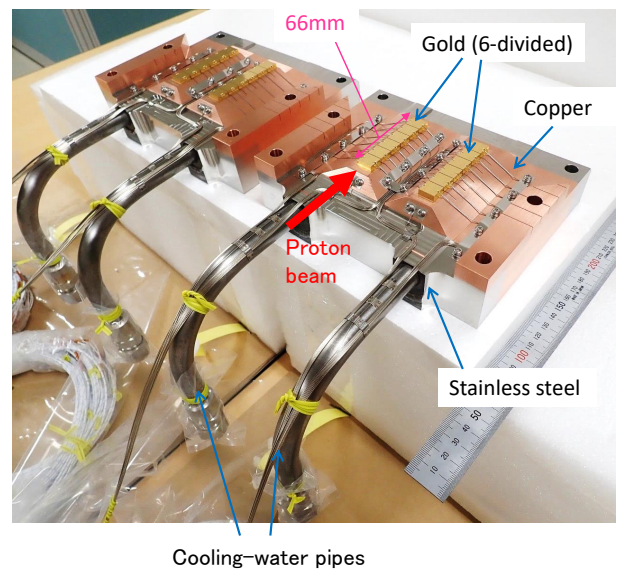


Fig. 7 製作した 95 kW 標的のブロックの組み立て前の写真。

Table 3 95 kW 標的の熱解析の結果のまとめ。

	応力分類	応力計算結果	許容応力
金本体 (375 °C)	熱応力	8.1 MPa	13.0 MPa
	高サイクル疲労 (shot 毎) に対する等価応力振幅	7.9 MPa	8.1 MPa
	低サイクル疲労 (連続運転の on/off) に対する等価応力振幅	8.2 MPa	12.2 MPa
接合部 (264 °C)	熱応力	9.0 MPa	13.2 MPa
	高サイクル疲労 (shot 毎) に対する等価応力振幅	9.0 MPa	12.2 MPa
	低サイクル疲労 (連続運転の on/off) に対する等価応力振幅	9.2 MPa	18.3 MPa

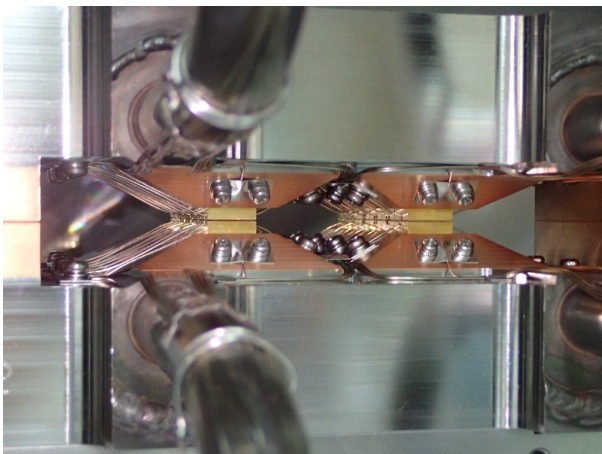
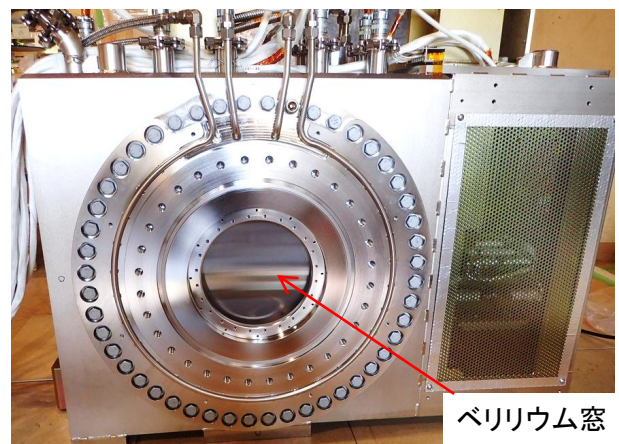


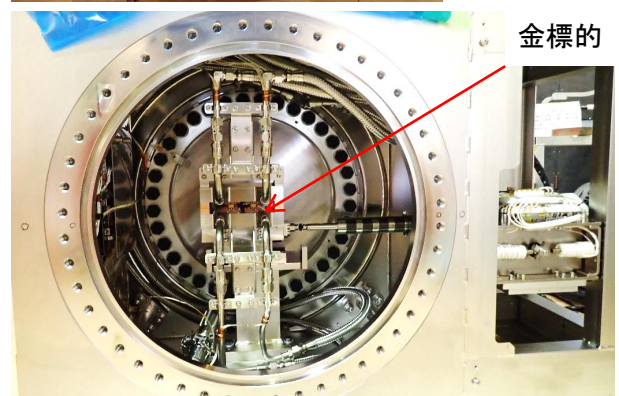
Fig. 8 95 kW 標的ブロックを組み立てた後の写真。

子ビームに耐えられると評価され、実機が製作された。Fig. 7 が金、銅、及びステンレス鋼配管を HIP で接合したブロックの写真である。金はそれぞれスリットでビーム方向に 6 分割され、その金の各ピースごとに、左右側面の角に熱電対をとりつけている。2 個のブロックのうち的一方を上下反転させてもう一方の上に乗せて組み立てた写真が Fig. 8 である。上下の金同士の隙間は、設計値 $0.3_{-0.05}^{+0}$ mm に対し、実測値は正面から見て右の金が 0.29 mm、左の金が 0.27 mm であった。

95 kW 標的の気密容器の写真が Fig. 9 である。上は、容器外観を上流側から写した写真で、ビー



ベリリウム窓



金標的

Fig. 9 95 kW 標的容器の写真。上の写真は容器外観を上流側から写したもので、下の写真は容器の内部を覗いた写真。

ム入り口にはベリリウム窓が取り付けられている。下は、その窓の付いたフランジを取り外して内部を覗いた写真であり、容器内の中央部に設置されているのが金標的の本体である。先に示した金標的の本体の組み立てた後の写真 (Fig. 8) は、この中央部をズームアップして撮影したものである。

2019年11月に50 kW 標的から95 kW 標的への交換作業が行われ、その後2020年5月からビーム照射を開始した。これまでトラブル無く安定運転を続けている。Fig. 10は、ビーム方向に6分割された金の各ピースごとに熱電対で測定している温度のモニター画面である。グラフが4枚あるのは測定点の違いで、それぞれ上の金の左右、下の金の左右の温度を示しており、各グラフに複数あるデータ線がビーム方向の位置の違いによるものである。これを見ると、右下のグラフが、スピルの最初の温度の立ち上がりが早く後半は温度上昇がなだらかになっている。これは、2秒間のビーム取り出しの間に、ビームの位置が右下から左上に向かってシフトしていることを示している。このように、標的の上下左右の温度を測ることにより、ビーム位置の推定もできるようになった [10]。測定した最高温度を、一次ビーム強度を横軸としてプロットしたものが Fig. 11 である。10%の範囲内で計算値と一致している。一次陽子ビーム強度は、MR 加速器グループの努力により順調に増強を続け、2021年に最大64.5 kW のビーム強度を達成している。

J-PARC では、2021年から2022年にかけて長期シャットダウンを行い、MR 加速器の電源を更新した。これにより、遅い取り出しのスパルサイクルは5.2秒から4.2秒程度まで短くできると期待されている。スパルサイクルが短くなれば、スパル当たりの陽子数が同じでも、時間当たりの平均ビーム強度が増える。逆に言うと、同じ平均ビーム強度を出すためには、スパルサイクルを短くした方が、スパル当たりの陽子数は少なく済む。ハドロン実験施設の固定標的は、連続でビームを照射することによるベース温度の上昇よりも、1スピルの温度上昇の方が大きく、最大温度は1ス

ピル当たりの陽子数でほぼ決まっているため、スパルサイクルを短くした方が、同じビーム強度でも標的の最高温度は下がる。そのため、スパルサイクルを短くすると受け入れ可能な最大強度が増える。

Fig. 12 に4.2秒サイクルで110 kW のビームを照射した時の95 kW 標的の熱解析結果を示す。5.2秒サイクル、95 kW の場合の結果 (Fig. 12) と同じような温度と熱応力に抑えられており、スパルサイクルを短くすることにより100 kW 超のビームも受け入れ可能であることが分かる。

4 回転標的

ハドロン実験施設では、95 kW 標的よりもさらに高いビーム強度に耐えられる生成標的として、直接冷却型の回転標的を現在開発中である。これは、母材のディスクの縁に金もしくは白金を接合したもので、その構成から通称“ユーロコイン”と呼ばれている。冷却は現在、水冷とヘリウムガス冷却の2通りを検討している。水冷の場合は立てたディスクの下1/4程度を直接水に沈めて冷却し、ガス冷却の場合はディスクにヘリウムガスを吹き付けて冷却する。

先に述べたように、ハドロン実験施設ではもともとニッケル製の回転標的を開発していたが、この時は、標的の上方、鉄とコンクリートの遮蔽体計3 mを隔てた外側に駆動モーターを設置し、そこから長いシャフトを通じて回転トルクを標的のディスクに与えていた。しかし、全体の構造が大きく複雑で、それらが全て標的の近傍に置かれる上、気密容器内への回転導入も課題であった。そこで、現在開発中の回転標的では、発想を転換して、循環させる冷媒の流れを回転駆動にも用いることにした。すなわち、水冷の場合は水車を、ガス冷却の場合は風車を使うのである。この駆動方式のメリットは、離れたところにポンプ等を置きそこから気密容器まで配管を繋げるだけなので、高放射線環境に置かれる物量を最小限に抑えられることと、容器の気密の確保が容易なことである。

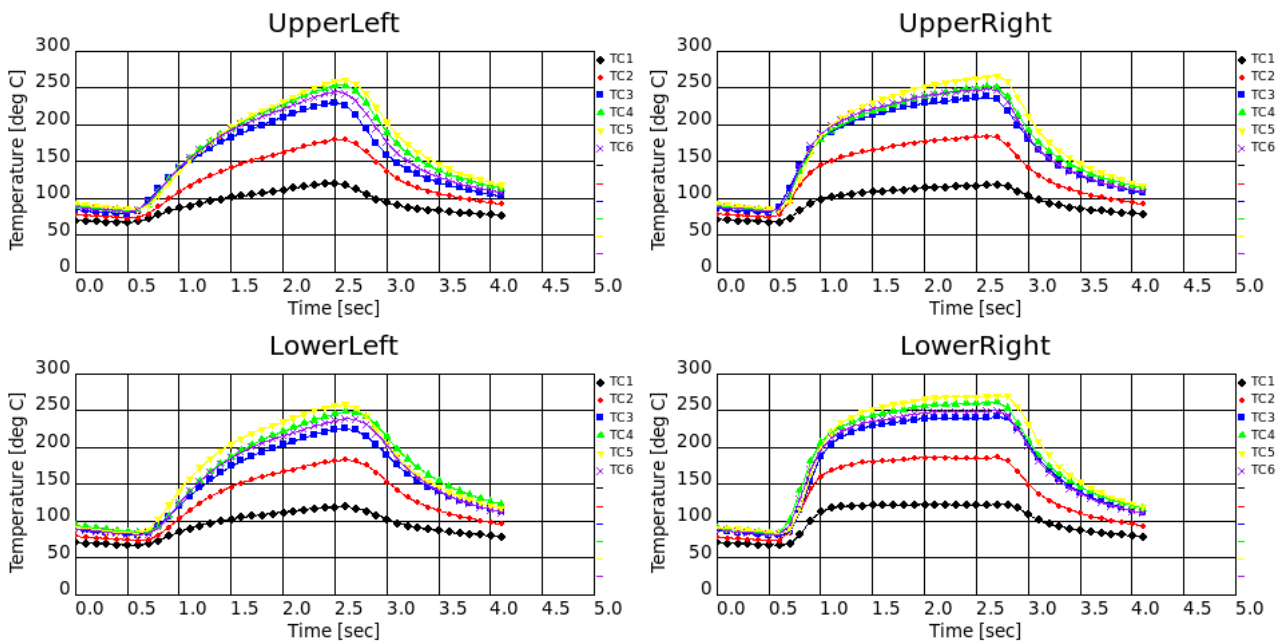


Fig. 10 95 kW 標的の温度モニター画面。

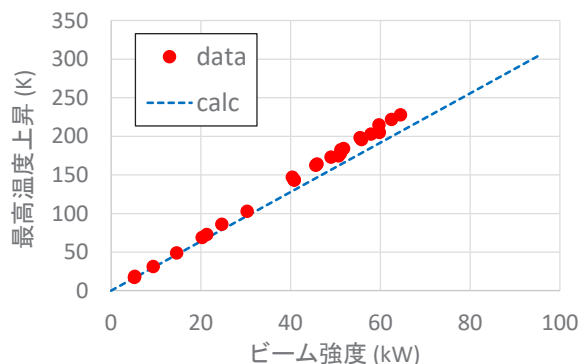


Fig. 11 95 kW 標的で実測した最高温度のビーム強度依存性。

水冷とガス冷却とを比較すると次の通りである。

水冷・水車方式

- 冷却効率が良い。
- 回転トルクが大きい。
- 大量のトリチウムや水素ガス、NO_x が発生する。
- 独立した水循環系が必要。
- 水分が入るので He ガス循環系も変更が必要。

ヘリウムガス冷却・風車方式

- トリチウム等の発生が極めて少ない。
- 冷却効率が不明。
- 回転トルクが小さい。
- 大流量のヘリウムガスポンプが必要。

この中でも特に、トリチウム等の“汚い”物質の生成が最も大きなポイントであり、今のところヘリウムガス冷却を第一候補として考えている。

発熱の分散のためにはディスク径は大きい方が有利であるが、回転標的の大きさは、標的容器の大きさから制限されており、ディスクの外径はφ346 mm が限界である。それは、設置場所のスペースが限られており。標的容器を現状より大きくすることができないためである。ディスクの厚さは66 mm で、固定標的の場合と同様、熱応力を緩和するために厚さ方向に分割する。

150 kW の入射ビーム強度に対してディスク全体を 50 W/m²/K の熱伝達率で冷却した場合の回転標的の熱計算を行った結果が、Fig. 13 である。ヘリウムガスの温度は 30 °C 固定、回転速度は 120 rpm としている。標的の発熱を分散させることにより、この程度の熱伝達率でも温度や応力を低く抑えることが出来ている。

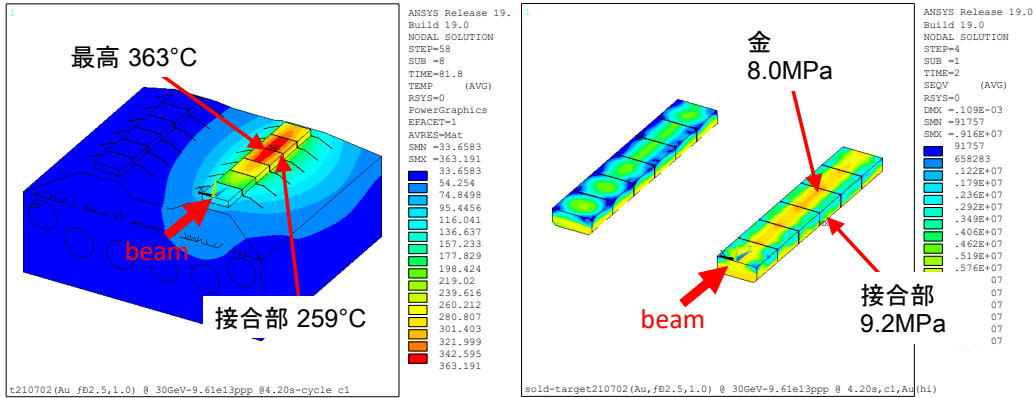


Fig. 12 4.2 秒サイクル、110 kW でビームを照射した時の 95 kW 標的の温度分布 (左) とミーゼス相当応力分布 (右)。

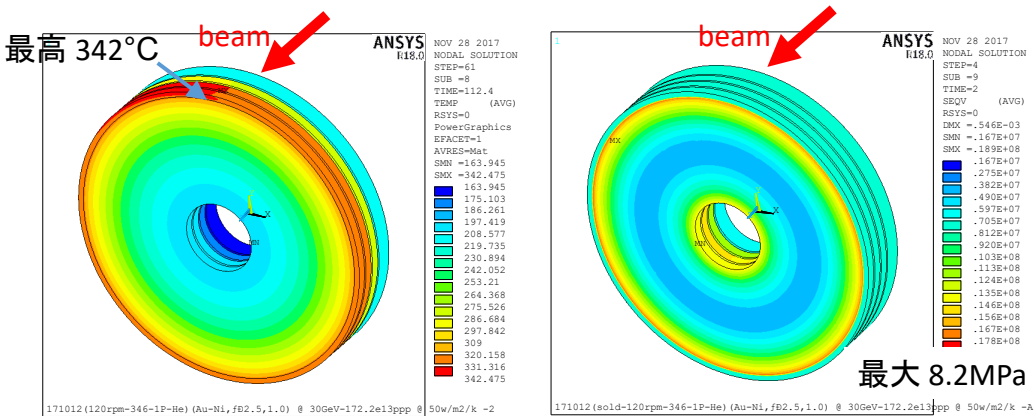


Fig. 13 ビーム強度 150 kW の時の回転標的の熱解析の結果。ディスク全体の熱伝達率は $50 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 、ヘリウムガスの温度は $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、回転速度は 120 rpm としている。

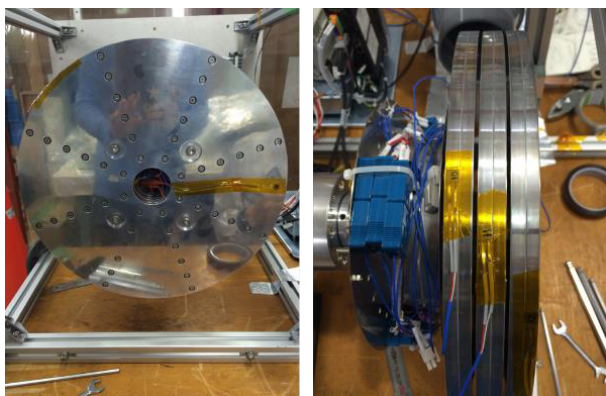


Fig. 14 冷却効率測定のための平板型回転標的模型の写真。

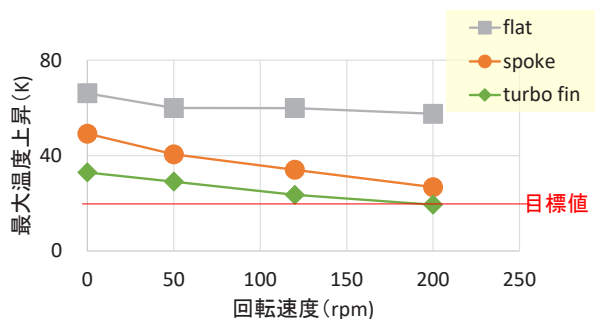


Fig. 15 各ディスク形状での冷却効率測定の結果。100 W の入熱があった時の最大温度上昇を示している。赤線で示した目標値は、150 kW 運転時の温度上昇 312 K (Fig. 13) に相当する。

4.1 冷却効率の測定

ヘリウムガス冷却の回転標的の実現には多くの R&D が必要である。例を挙げると、ユーロコインの製作方法、ガスタービン (風車) 駆動とその制御、ヘリウムガスの冷却効率の測定、高気密の大流量ガスポンプの開発、温度モニターや回転速度モニターの開発、等々がある。この中でも特にヘリウムガス冷却の実現の鍵を握るのが、冷却効率の測定である。そのためにハドロン実験施設では、標的を模擬したアルミ製のディスクにヒーターと熱電対を埋め込んだものを用意し、回転速度やガスの吹き付け方、ディスクの形状などを変えながら、ディスクとガスとの熱伝達率の測定と向上を進めてきた [13,14]。

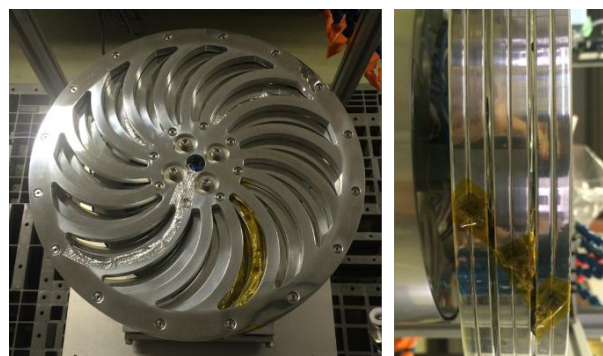


Fig. 16 冷却効率測定のためのスポーク型回転標的模型の写真。



Fig. 17 冷却効率測定のためのターボフィン型回転標的模型の写真。

まず最初に、最も単純な平板型のディスク (Fig. 14) を用いて、測定方法の確立と基礎データの取得を行った。測定結果を Fig. 15 に四角マークで示す。平板でも1枚だけならば十分冷えるが、複数枚重ねた場合、間に入ったディスクはほとんど冷えないことが分かった。そこで、内側のディスクにも風が通るよう、ディスクに穴を開けたスポーク型 (Fig. 16) を試した。平板型に比べて大きく改善したものの、まだ目標には届かない結果 (Fig. 15 の丸マーク) となった。そこで、ディスク全体は分割せずに一体にして、さらに円板自身の回転によりガス流体の駆動力を積極的に発生させることのできるターボフィン型 (Fig. 17) を製作した。ただし、ビームが入射する外縁部は、熱応力緩和のためスリットを入れて厚さ方向に分割してある。ターボフィン型の測定結果を Fig. 15 に菱形マークで示す。厚さ方向に一体とすることで回転標的全体を効率よく冷却することができ、200 rpm の回転速度で、目標の冷却効率を達成することができた。

4.2 気体軸受の開発

回転標的の寿命を決めるのは、多くの場合軸受である。標的容器の密封構造やその残留線量を考えると、内部のベアリングが壊れた場合は、標的容器丸ごと交換となる。標的本体が非常に高価なこと、交換作業には残留放射能の冷却期間を含め長期のシャットダウンが必要なことから、標的の交換頻度は多くても5年に1回以下に抑えたい。しかし、標的環境で実績のある耐放射線ボールベアリングを使用した場合、標的円盤の重量 (約40 kg) から予想される寿命は200 rpm で約1年である。一方、数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 計算によれば、ターボフィン型は回転速度を上げるとさらに冷却効率が上がることが期待される。しかしながら、回転速度を上げれば、軸受の寿命はさらに短くなる。

そこでハドロン実験施設では、理想的には寿命の制約がなく、さらに200 rpm以上の高速回転

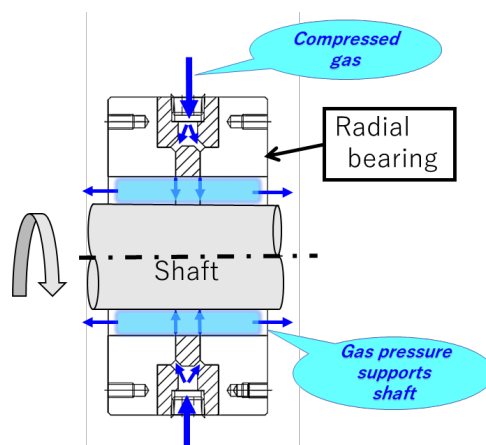


Fig. 18 気体ラジアル軸受の仕組み。外部から供給された圧縮空気の圧力によってシャフトを支える。

も可能な軸受として、気体軸受を現在開発中である [15]。気体軸受とは、気体を潤滑剤とした滑り軸受の一種であり、T1 標的の場合では気体として He ガスを使用する。Fig. 18 の模式図にあるように、シャフトと軸受の間に高压の気体を流し、その圧力によってシャフトを支える構造である。ボールベアリングと比較した時の気体軸受のメリットとしては以下のことが挙げられる。

1. 回転抵抗が極めて少ない (軽く回る)。
2. 温度変化による潤滑剤 (気体) の性状変化が少なく安定している。
3. 気体が常に流動しており放射線で劣化しない。

一方、以下のようなデメリットがある。

1. 剛性が低く、外乱に対する減衰性が劣る。
2. シャフトが軸受に噛むと (簡単には) 復帰できない。
3. 1 μm レベルの加工精度が必要。

気体軸受には、シャフトを支える気体圧力の発生方法の違いによって、動圧型、静圧型、複合型といった種類があるが、T1 標的においては、荷重が約40 kgと比較的大きい一方、目標回転速度は500 rpmと比較的低速であることから、外部

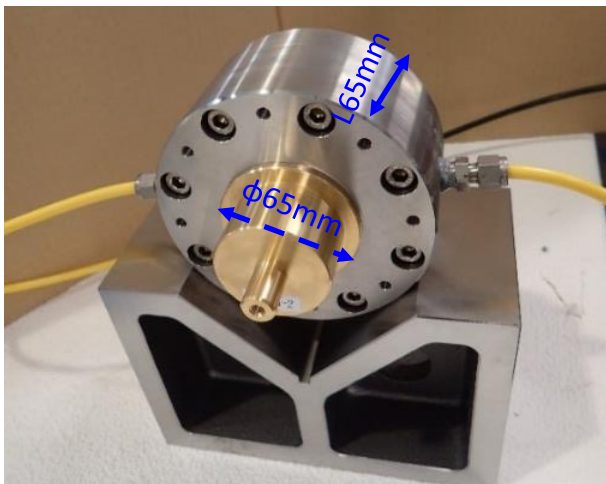


Fig. 19 気体ラジアル軸受の試作 1 号機の写真。

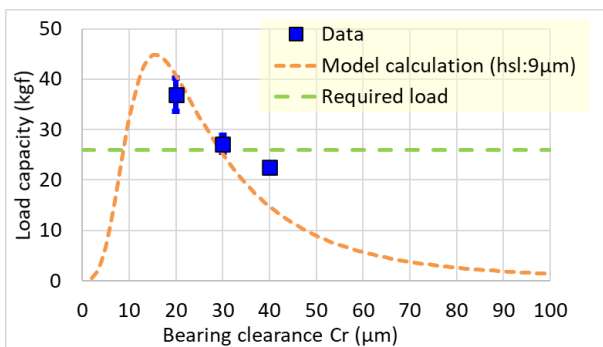


Fig. 20 試作した気体ラジアル軸受の静的負荷容量の測定結果。

から高圧気体を供給する静圧型を採用した。必要な負荷容量は、荷重 40 kg を軸受 2 個で支えるため 1 個当たりでは 20 kg となり、それに安全率 1.3 をかけて 26 kgf と設定した。気体ラジアル軸受の試作 1 号機の写真が Fig. 19 である。軸受の長さは標的容器との取り合いから 65 mm と定まり、上記の負荷容量を得るためにシャフト外径も 65 mm とした。軸受の材質は強度の高い SUS630 で、析出硬化処理済みのものである。

この試作機について、静的な負荷容量の測定を行った。軸受の半径隙間として 20、30、40 μm となる 3 種類のシャフトを用意し、それぞれについて測定した。供給するヘリウムガスのゲージ圧 0.5 MPaG、偏芯率 (軸受隙間に対する軸の偏芯量の割合) が 0.4 の時の負荷容量の測定結果を

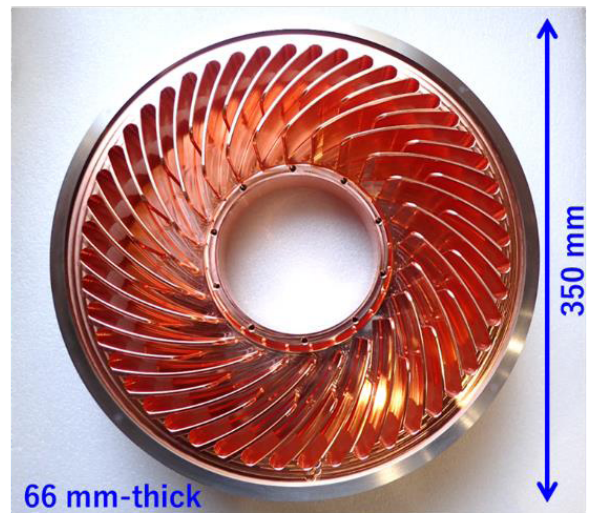


Fig. 21 実機相当のサイズ、重量を持った模擬円盤の写真。

Fig. 20 に示す。軸受隙間 30 μm の時の負荷容量が 27.1 kgf と、目標値をクリアしている。

4.3 回転実証試験

試作した気体軸受に実機と同じ負荷をかけて回転させる実証試験を行うため、模擬標的を製作した。Fig. 21 が製作した模擬標的の写真である。円盤内側は無酸素銅をターボフィン型に加工したもので、外縁部は実機の重量を模擬するためにタングステン合金を使用している。安全側の評価とするため実機より外径を 4 mm 大きくし、金を想定した時の実機重量より 1.6 kg 重たくしている。

この模擬標的と、前小節の空気ラジアル軸受 2 個を用いて、円盤を実際に回転させる実証試験を行った。Fig. 22 が、そのセットアップの写真である。約 7 μm の精度で軸受位置のアライメントを実施して組み立てた結果、空気を軸受へ給気した場合と、ヘリウムガスを給気した場合のどちらも、目標値を超える 550 rpm の回転速度を安定して達成することが確認できた。

標的ディスクに外部から衝撃が与えられた場合にどうなるかを検証するため、インパルスハンマーを使った衝撃試験を行った。模擬標的にイン

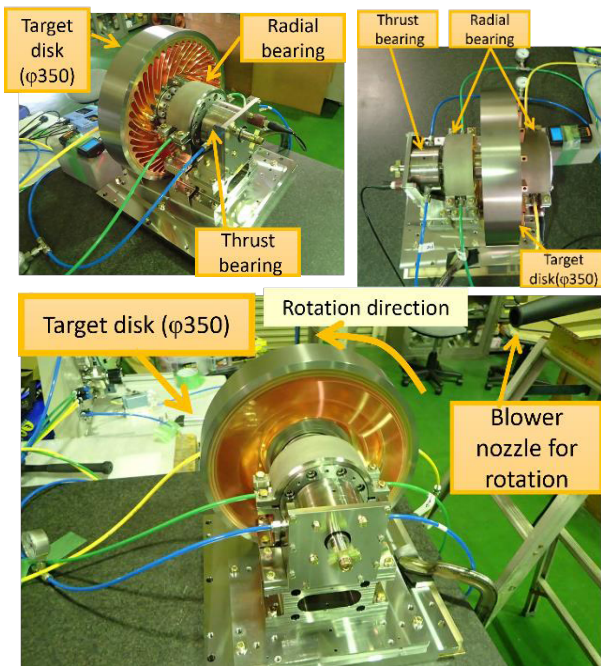


Fig. 22 回転実証試験のセットアップ。

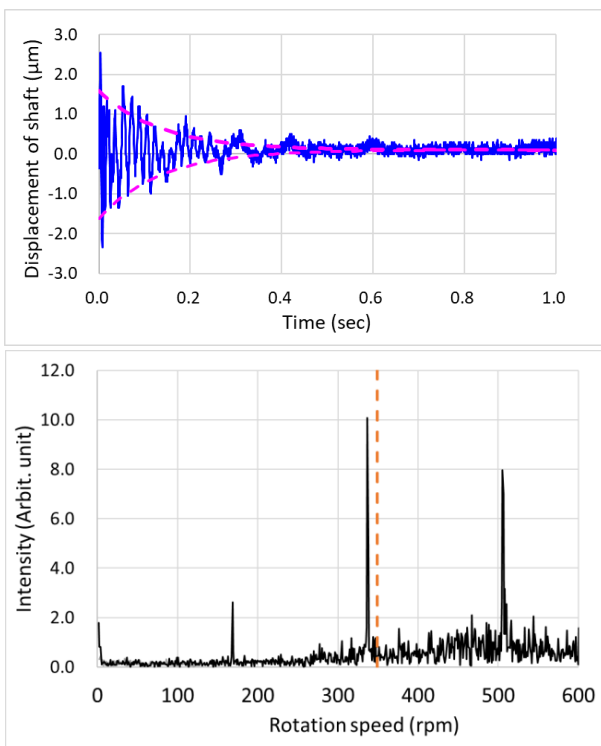


Fig. 23 インパルスハンマーを用いた衝撃試験の結果。模擬標的に 200 N 以上の衝撃を与えた際のシャフトの変位 (上) と、それをフーリエ変換した結果 (下)。下図の点線は、軸受の共鳴振動数の計算値を示す。

パルスハンマーで 200 N 以上の衝撃を加えた時のシャフトの変位を測定した結果が Fig. 23 である。図の上のグラフが測定されたシャフトの変位で、それをフーリエ変換した結果が下のグラフである。200 N 以上の衝撃が与えられても軸受がかんだりすることなくシャフトは定常位置に戻り、また共鳴振動数は計算値とほぼ一致していた。

4.4 変位計の開発

回転標的は、これまでの固定標的とは違って「動く」標的であるから、その監視のためのセンサー類も非常に重要である。しかも、生成標的直近で用いるセンサーであるから、極めて高い耐放射線性が要求されるため、既製品ではなく、新たに開発する必要がある。ここでは、そのような R&D の一例として、標的円盤の軸ずれ等を監視するための変位計 [16] を紹介する。

変位計による回転標的の監視の概念図を Fig. 24 に示す。変位計としては、対象物との間の静電容量を測定することで対象物との距離を測る静電容量型を用いる。そのような変位計プローブを標的円盤の側面に向けて設置すると、静電容量の周期的な変動が測定でき、その変動の振幅と周期から標的円盤の偏心度、偏心周期が分かる。この時、円盤側面にわざと引っ張りをつけておくと、静電容量が局所的に大きく変化するので、より確実に円盤の回転周期が測定できる*。さらに、円盤を挟むようにプローブを 2 個設置すれば、それぞれの出力平均値の差は、標的が回転によって冷却された際の収縮度に対応する。また、He ガスの純度や圧力が変化すると比誘電率が変化するので、2 個のプローブの同期した出力の変化を測定することでそれを評価することができる。

プローブから長くケーブルを伸ばすことで読み出し回路は放射線レベルの低い環境に置くこ

*回転モニターとしては、回転軸に取り付けたローターと、セラミック被覆ケーブルを用いた励磁コイルとピックアップコイルを組み合わせた耐放射線性回転センサーを別途開発している [17]。

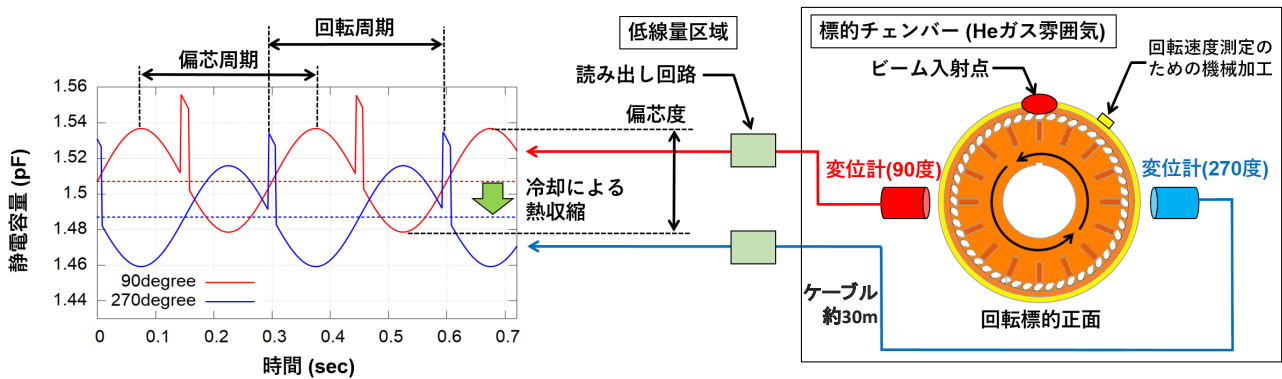


Fig. 24 変位計による回転標的の監視の概念図。

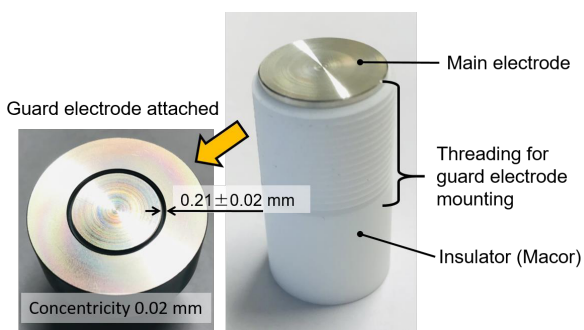


Fig. 25 試作した耐放射線変位計の写真。

とができるが、プローブは標的本体の直近に設置しなければいけないので、非常に高い放射線耐性 (150 kW のビーム強度で 10000 時間運転した際の吸収線量が約 200 MGy) が求められる。過去にも加速器用として放射線環境下での使用を想定した変位計が開発されている [18] が、それはプローブ内の絶縁体や被覆にポリエチレンや PEEK 材を使用しており、今回のような極度の高放射線場には適用できない。そこでハドロン実験施設では、無機材料のみで構成された変位計プローブを開発した。試作した耐放射線プローブの写真が Fig. 25 である。絶縁材には、快削性に優れ精密な機械加工が可能なマシンブルセラミック (MACOR、マコール [19]) を使用した。絶縁体のクリアランスとしては、設計値が市販のエポキシ絶縁プローブと同じ 0.2 mm に対し、実測値はクリアランス 0.21 ± 0.02 mm、同心度 0.02 mm であった。

先行研究 [18] を参考に、変位量に比例した電

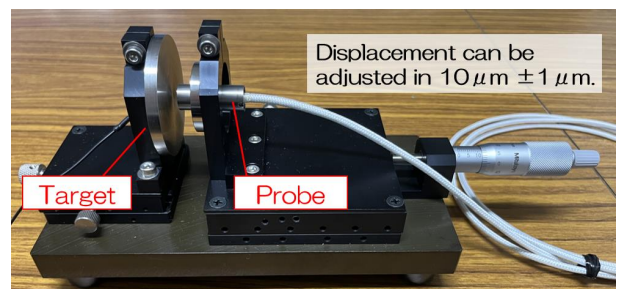


Fig. 26 変位計の分解能評価試験のセットアップ。

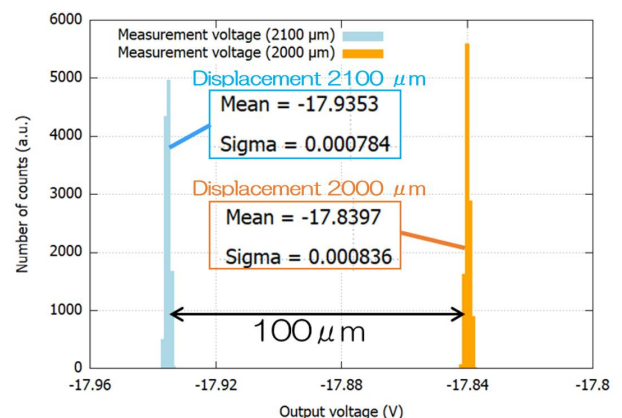


Fig. 27 分解能評価試験で得られたデータの例。

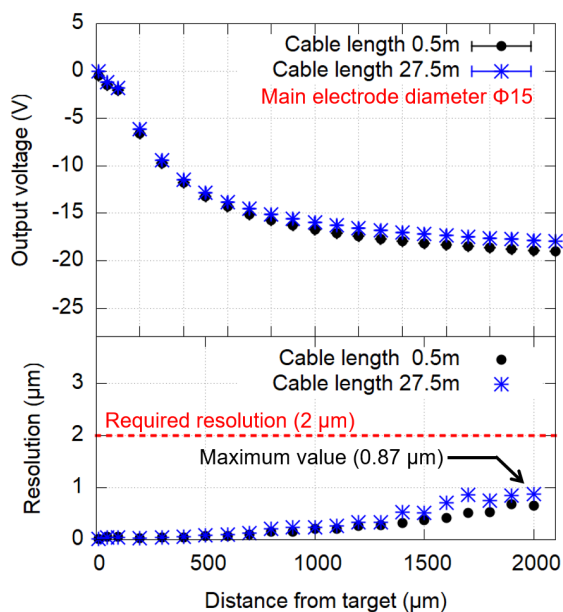


Fig. 28 耐放射線変位計の分解能評価結果。上が出力電圧、下が分解能である。

圧を出力する簡易的な読み出し回路を作成し、試作したセラミック絶縁プローブの分解能を評価した。想定される標的円盤の偏芯度が気体軸受のクリアランスから $20\ \mu\text{m}$ 程度であるので、本変位計に要求される分解能は $2\ \mu\text{m}$ である。Fig. 26 に示したような校正台にプローブを取り付け、ターゲットとプローブとの間隔を $100\ \mu\text{m}$ ずつ変化させながら出力電圧を測定した。Fig. 27 が、ターゲットとの距離を $2000\ \mu\text{m}$ と $2100\ \mu\text{m}$ に固定した時の出力電圧の測定結果である。2つの出力電圧の差が $100\ \mu\text{m}$ の変位に相当するので、各変位ごとの平均値と幅 (σ) から、分解能を評価できる。各変位ごとに得られた出力電圧の平均値と分解能をプロットしたものが Fig. 28 である。本来ならば変位に比例した出力電圧が得られるはずがそうになっていないのは、読み出し回路の機能が不十分で、オペアンプの入力抵抗と入力容量の影響が出ているためとみている。一方、ケーブル長の影響に対しては、同軸ケーブルの浮遊容量をキャンセルするように回路素子を調整することにより、ケーブル長を長くしても $0.5\ \text{m}$ の時とほぼ同様の出力電圧を得られた。これにより、ケーブ

ル長を長くすることによる分解能の劣化を抑えることができ、目標分解能 $2\ \mu\text{m}$ を達成できた。

しかし、出力電圧の線形性が悪いこと、また、同軸ケーブルの浮遊容量のキャンセルがまだ十分でなく、ケーブルの温度による出力電圧の変動がみられることから、現在、読み出し回路の改良を進めているところである。

5 終わりに

本講義では、標的本体を中心に取り上げたが、それを収納する気密容器の方が、万が一標的が損傷を受けた場合に放射性物質の拡散を防ぐ役割を持つので、放射線安全の上ではより重要である。容器の中でも特に、直接一次ビームに晒されるビーム窓の重要性は極めて大きい。気密容器やビーム窓については参考文献 [4, 10, 20] を参照されたい。

また、大強度ビームを受ける生成標的やビーム窓では、材料の放射線損傷の影響が避けられない。しかしながら、放射線損傷による材料の物性変化の実データは非常に限られているのが現状である。現在、そのようなデータの蓄積を目指す国際共同研究 RaDIATE (Radiation Damage In Accelerator Target Environments) [21] が進められており、J-PARC もメンバーとして実験に参加している。

参考文献

- [1] G.Y. Lim, “HD 中性二次ビームライン”, 高エネルギー加速器セミナー OHO’23 (2023).
- [2] 高橋仁, “HD 荷電二次ビームライン”, 高エネルギー加速器セミナー OHO’23 (2023).
- [3] 高橋仁, “二次粒子生成標的と二次ビームライン”, 高エネルギー加速器セミナー OHO’18 (2018).
- [4] H. Takahashi *et al.*, “Indirectly Water-Cooled Production Target at J-PARC Hadron Facility”, *J. Radioanal Nucl. Chem.* **305** (2015) pp.803-809, doi: 10.1007/s10967-015-3940-9.

- [5] H. Takahashi *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における間接水冷型生成標的の開発”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2015, pp.1045-1049.
- [6] H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン施設における標的監視用ヘリウムガス循環装置の構築”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp.944-948.
- [7] R. Muto *et al.*, “Monitoring System for the Gold Target by Radiation Detectors in Hadron Experimental Facility at J-PARC”, Proceedings of the 13th International Conference on Radiation Shielding, EPJ Web of Conferences **153** (2017) 07004-1-6.
- [8] H. Takahashi *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における新しい二次粒子生成標的の開発”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2017, pp.660-663.
- [9] H. Takahashi *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における新しい二次粒子生成標的の開発 (2)”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2018, pp.879-882.
- [10] M. Saito *et al.*, “Indirectly cooled secondary-particle production target at J-PARC Hadron Experimental Facility”, Phys. Rev. Acc. Beams **25** (2022) 063001.
- [11] <https://mars.fnal.gov/>
- [12] <https://www.ansys.com/>
- [13] R. Iwasaki *et al.*, “J-PARC ハドロンビームライン用回転円板型標的の開発”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp.949-953.
- [14] R. Iwasaki *et al.*, “J-PARC ハドロンビームライン用回転円板型標的の開発 (2)”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2020, pp.402-406.
- [15] H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における回転円盤型 2 次粒子生成標的のための気体軸受の設計”, Proceedings of 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2022, pp.427-431.
- [16] F. Muto *et al.*, “J-PARC ハドロン回転標的監視のための耐放射線変位センサーの開発”, Proceedings of 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2022, pp.634-638.
- [17] H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における 2 次粒子生成標的の耐放射線回転センサーの開発”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2017, pp.655-659.
- [18] M. Arinaga *et al.*, “BPM displacement measurement by gap-sensors at KEKB”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2006, pp.904-906.
- [19] CORNING Inc., <https://www.corning.com/specialtymaterials/macor>
- [20] H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設におけるベリリウム製ビーム窓の設計”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2018, pp.388-392.
- [21] <https://radiate.fnal.gov/>