

2 次粒子生成標的の開発

J-PARC ハドロン実験施設では、加速器によって 30 GeV まで加速された陽子ビームを遅い取り出し装置により 1 サイクル(約 5 秒)あたり 2 秒間の直流ビームとして引き出し、その 1 次陽子ビームを金属製の 2 次粒子生成標的 (以下、標的) に照射している。ビーム照射により標的に生成される 2 次粒子のうち、主に K 中間子や π 中間子を 2 次ビームラインにて輸送し、複数の実験エリアへ供給している。各実験エリアでは、K 中間子等を利用した独創的でバラエティーに富んだ原子核物理実験・素粒子物理実験を遂行している。

現在、ハドロン実験施設においては、2019 年に設置した純金製の標的を使用している (図 1)。標的の本体は放射線安全の観点からヘリウムガスが封入された気密容器内に設置され、そのヘリウムガスは密閉循環としており、ガスの状態を監視している。標的には、ビーム照射により熱負荷が発生するため、熱応力・熱疲労で許容できる温度範囲に収まるよう冷却が必要となる。現行の標的 (金) は固定型、つまり動かない標的で、金は銅ブロックに接合されており、銅に冷却水を通すことで除熱する間接水冷型である。この標的は、加速器サイクル 5.2 秒の場合、1 次陽子ビーム強度で 95 kW まで照射可能である。ハドロン実験施設では 2009 年の運転開始以降、ビーム強度を順次増強しており、2021 年には現行標的により 64 kW の安定したビーム運転を達成した。30 GeV 領域で、遅い取り出しによる K 中間子供給を目的とした実験施設としては、すでに世界最大級のビーム強度ではあるが、物理実験の要請から、今後 100 kW を超えて 150 kW へとビームの大強度化を検討している。

上述したとおり現行標的は固定型で、同じ位置にビームが照射され続けるため、物性 (熱容量) の制約から冷却能力を上げたとしても 1.5 倍のビーム強度を受けるとは困難であると評価している。そこで、図 2 に示すような回転円盤型標的の開発を進めている。円盤の外周近くにビームを照射することで、円周方向に熱負荷を分散する方式である。しかし、これまでは無い“回転”という新要素が加わることになる。標的の近傍は放射線レベルが高く、運用開始後の部品交換といったメンテナンスは困難である。そのため、メンテナンスフリーで長期間 (例えば 3 年以上) 使える回転システムの構成としたい。一方、これまで実施した

模擬円盤による冷却試験から、ヘリウムガス中で 500 rpm の回転速度があれば 150 kW ビーム照射が可能であると評価している。つまり、放射線環境で長期間使用でき、500 rpm で円盤を回転できるシステム（軸受）により実現可能となる。ところが、標的環境で実績のある耐放射線ボールベアリングでは寿命・回転速度の両面で適用が困難であることがわかった。そこで、容器内で使用しているヘリウムガスを利用した流体軸受（気体軸受）の開発に挑戦することとした。気体軸受は、軸受とシャフトの間の 10~30 μm 程度のわずかな隙間に対し、数気圧程度の圧縮ガスを”絞り”と呼ばれる吹き出し口から流し込むことで圧力層を形成し、その圧力によりシャフトを支える（浮上させる）仕組みである。また、ガス流体が潤滑材として働くもので、常に流動しているため放射線による劣化はなく、しかも摩擦が低いため高速回転に適している。ただし、実現には極めて良い加工精度（最も厳しいところ 1 μm レベルの公差）での機械加工が必要であり、実際に最も苦戦したところである。2年近くの試行錯誤の結果、円盤を十分に支えられる軸受セットの開発に成功し、500 rpm の安定的な円盤回転を達成するに至った。しかし、軸受とシャフトの隙間がとても狭く、ガス流体で支えているため剛性（保持力）が他の軸受と比べてやや低いことなどから、運用上で心配なこともある。たとえば回転中に地震が起こって外乱を受けた場合に、ガス圧力でシャフトを支えきれないほどの負荷がかかると、シャフトが軸受に衝突して焼き付きが起こる可能性がある。そこで図 2 の右写真に示すように大型の振動試験機のある試験場へ回転円盤一式を持ち込み、地震波を模擬した振動試験を実施した。結果として、震度 6 強相当の地震が起こったとしても回転動作に問題がないことを確かめられた。さらに焼き付き自体を抑止するための軸受改良にも成功し、回転システムとしては実機へ適用可能な水準に到達したと考えている。

今後、150 kW ビームに対応した標的システム全体の実機設計確立に向けて、円盤本体の試作試験、円盤健全性監視のための耐放射線センサ類の開発、および周辺装置としてヘリウムガスコンプレッサの開発などを並行して進め、2024 年度中に全体設計を統合することを目指している。その後、設計の妥当性確認を実施した上で、実機製造に着手することを検討している。

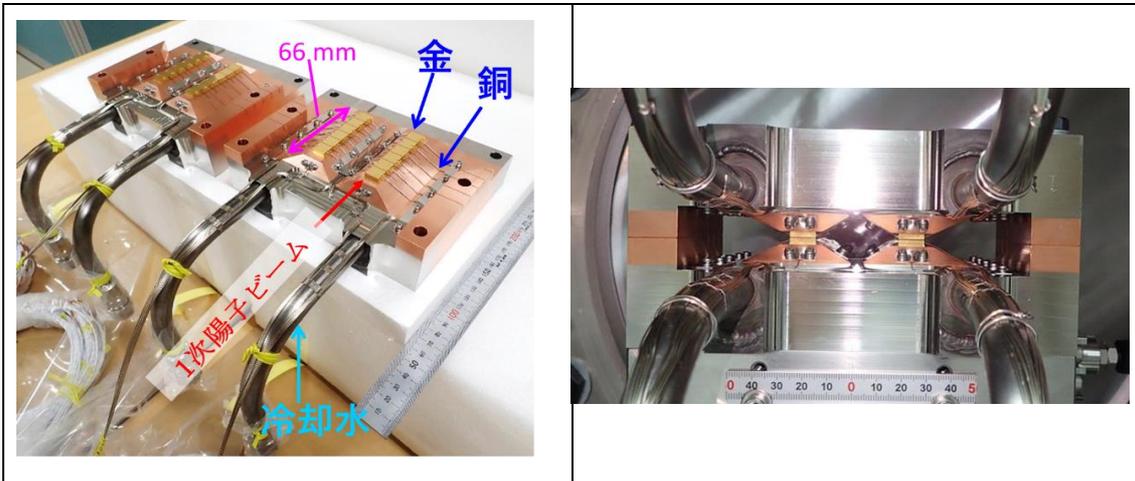


図 1：左は組立前の 95-kW 標的の写真。右は組立後の 95-kW 標的の正面（上流面）写真。標的はヘリウムガスを封入した気密容器中に設置されている。

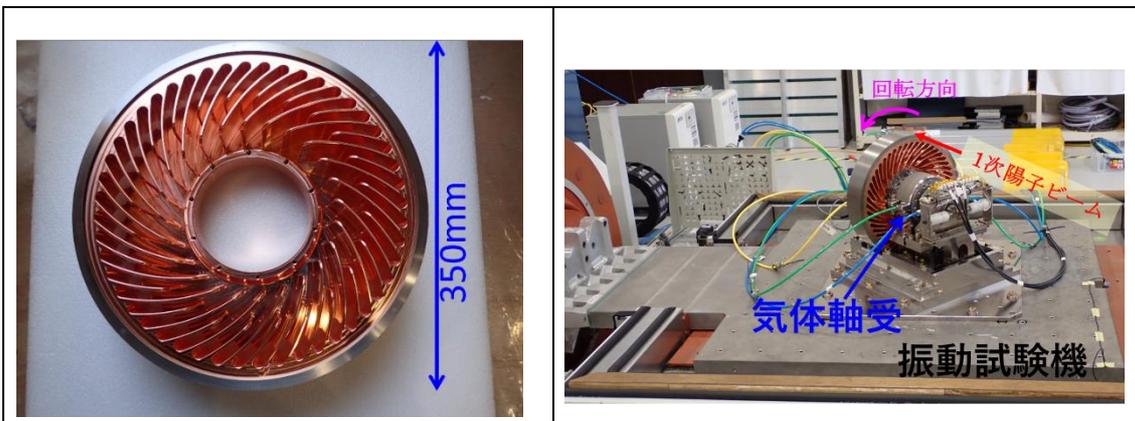


図 2：回転円盤型標的の試作機写真。左図は、外周部がタングステン合金、内側は銅で構成され、銅部分は冷却のためにターボフィン形状に機械加工されたものである。右図は、気体軸受を使用した回転システムに円盤を組み込んだ写真で、地震想定振動試験を実施した際のものである。