

大強度化運転に向けた核破砕水銀ターゲット容器の製作技術と設計の改良

IMPROVEMENT OF FABRICATION TECHNOLOGIES AND THE DESIGN OF SPALLATION MERCURY TARGET VESSEL FOR HIGHER POWER OPERATION

若井栄一^{#,A)}, 涌井隆^{A)}, 粉川広行^{A)}, 直江崇^{A)}, 管文海^{A,B)}, 木下秀孝^{A)}, 花野耕平^{A)}, 羽賀勝洋^{A)}, 高田弘^{A)}, 二川正敏^{A)}, 木村優志^{C)}, 上羽亮平^{C)}, 木原 安彦^{C)}, 仙入克也^{C)}, 鹿又研一^{D)}, 島田翼^{D)}, 芹澤久^{E)}, 森裕章^{E)}
Eiichi Wakai^{#,A)}, Takashi Wakui^{A)}, Hiroyuki Kogawa^{A)}, Takashi Naoe^{A)}, Hidetaka Kinoshita^{A)}, Wenhai Guan^{A,B)}, Katsuhiko Haga^{A)}, Hiroshi Takada^{A)}, Masatoshi Futakawa^{A)}, Masashi Kimura^{C)}, Ryouhei Ueha^{C)}, Yasuhiko Kihara^{C)}, Katsuya Sennyu^{C)}, Kenichi Kanomata^{D)}, Tsubasa Shimada^{D)}, Hisashi Serizawa^{E)}, Hiroaki Mori^{E)}

^{A)} J-PARC Center, JAEA

^{B)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{C)} Mitsubishi Heavy Industries Machinery Systems, Ltd.,

^{D)} Metal Technology Co Ltd.,

^{E)} Osaka Univ.

Abstract

This paper was mainly summarized the development status of the fabrication technology and design of mercury target vessels (modules) for high-intensity operation in a spallation neutron source of J-PARC. Some upgrading types such as semi-constraint free and constraint free types were evaluated with some mock-up tests, and the constraint free types are selected and under fabricating for higher power operation of 1 MW under 25 Hz, 3 GeV proton beam.

1. はじめに

基礎科学や産業の発展のため高エネルギー加速器標的システムで生成される2次粒子によるビーム利用実験が数多く行われ、従来に比べてビーム強度を数倍高くさせたビーム利用が期待されている。J-PARCセンターの物質・生命科学実験施設(MLF)の中性子源システム[1]は、2008年より運転を開始し、3 GeVの25 Hzのパルス陽子ビーム下で段階的に運転出力を上げた運転を実施している。今期(2018年)前半の4月18日~6月30日まで500 kWの安定な利用運転(水銀ターゲット容器8号機にて)を実施した[2]。また、1 MWでの大強度運転が期待されている中、J-PARCセンター施設で、2018年7月3日に1 MW相当運転をJ-PARCのMLF施設で実施し、約1時間、連続運転に初めて成功した[2]。

2015年に500 kW運転時に発生した水銀ターゲット容器(5号機、7号機)で2度の不具合の解析等[3-7]も踏まえ、それを乗り越えて500 kW安定運転のために実施した水銀ターゲット容器(8号機)での製作の大幅な改良と検査を実施した[3,4]。また、今後の水銀ターゲット容器の構造設計と製作技術の改良及び製作状況の概要など[4,8-11]を次節以降で紹介する。8,9号機の概念図をFig. 1に示す。本機の詳細な技術的開発の内容については、2018年11月11日から16日にいわき市で開催されるIWSMT-14(第14回核破砕材料と技術に関する国際ワークショップ)でJ-PARCの涌井ら[9]によって報告される予定である。

なお、2015年に新しい水銀ターゲット容器(第5号機)を用いて、陽子ビーム強度を徐々に500 kWまで上昇させたところ、水銀標的容器の2重保護容器の一部で損

傷が発生している。この原因は水銀ターゲット容器において水銀容器と保護容器間の強度を高めるためにボルト止め構造を採用し、このボルト周辺では複雑な溶接構造と取っている。運転で発生する高サイクル疲労などが起因して保護容器のボルト周辺の溶接部のき裂進展で生じた損傷によるものと考えられている[3]。また、この後に、同型の未使用の水銀ターゲットモジュール(第7号機)に対してボルト周辺部の補修溶接を事前実施後、500 kWで運転をしたが、比較的短時間で破損が生じ、5号機とは別な原因で損傷が生じたことが推測されている。その調査について、H28~H29年度、大阪大学(接合研など)との共同研究やオーストラリア ANSTOとの共同研究なども実施し、その原因解明を進めた。

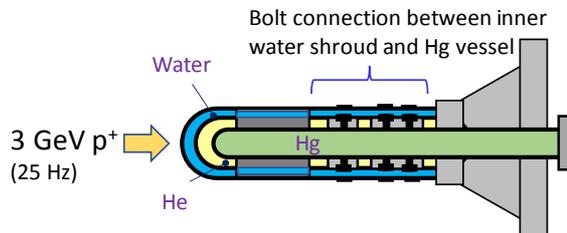


Figure 1: A Schematic cross section image of improved structure of 8th and 9th mercury target vessels (modules), which has a constraint structure between water shroud and Hg vessel with monolithic structure. This target was operated from Oct. 2017 to July 2018.

[#] wakai.eiichi@jaea.co.jp

2. 水銀ターゲット容器の基本構造

水銀ターゲットモジュールは、水銀を核破砕ターゲットとして水銀容器中を循環させた冷却方式を採用し、水銀漏えい防止のため、水銀容器の周りを水で冷却した保護容器で覆い、水銀容器と保護容器の間に約0.12 MPa程度の圧力をかけたヘリウムを流している。これらの容器材料には、SUS316鋼に比べて強度が1割程度低いが、水銀や水に対して耐食性に優れたSUS316L鋼で製作している。SUS316Lに対して窒素濃度を高めて高強度にしたSUS316LN鋼は構造強度の設計評価により有利であるが、コストが高く調達時間がかかる課題があるが、今後の有力な候補材料として期待されている。また、高エネルギーのパルス陽子線によって水銀中でキャビテーションが生じるが、Heマイクロバブルを水銀内に導入し、キャビテーションによる材料損傷の対策を施している[12]。また、材料の表面を低温浸炭処理(Kolsterising表面処理)で表面を約1~1.2 GPaに硬化[13, 14]させ、その懐食性能をやや高めている[13]。水銀容器はビーム入射壁を3 mmにしているが、それ以外は約8 mm以上の厚さを持つ。さらにビーム側の壁には、キャビテーションによる損傷を防ぐように内壁(厚さ5 mm)が取り付けられている。この水銀容器は、システム外への水銀漏洩の防止のため、2重の保護容器で覆った多重容器構造を持つ。Table 1に運転時の水銀ターゲットモジュールの圧力や温度条件を示す。

Table 1: Design Condition of Hg Target Vessel (Module)

	Design Pressure (MPa)	Temperature of inlet (°C)
Hg (Layer)	0.5	50
He (Layer)	0.2	25
H ₂ O (Layer)	*0.2 - 0.5	25

*0.5 MPa for #10, #11, and #12, 0.2 MPa for #8 and #9

2017年10月から2018年7月初めまで運転に供用したターゲットの製作については、水銀ターゲット容器において陽子ビームや核破砕による熱負荷が大きい領域において、容器構造の改良、溶接部の削減や溶接方法の改良を行うとともに、容器の健全性を調べるために最新の超音波検査技術を駆使して溶接部などの欠陥の有無等を調べながら改良型標的容器の製作[2,8]を進めたものである。

3. 1MW 時の熱応力と内圧に耐える容器構造の検討過程と製作状況

従来の水銀ターゲット容器の拘束型構造において、品質工学の分野で用いられている田口メソッドにより、内部構造の最適化検討を行い、運転中に発生する応力をかなり低減できたものの、高出力の安定運転に限界があることが分かっている[8]。このため、1 MW 時の熱応力と内圧に長時間安定に耐える水銀ターゲット容器の検討

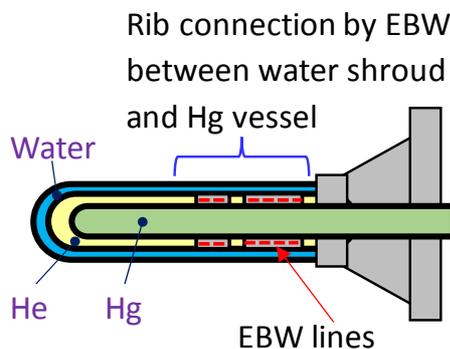


Figure 2: Constraint free target vessel type in the fore part between water shroud and Hg vessel.

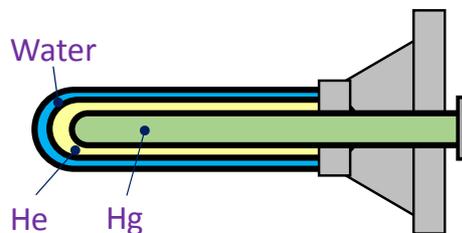


Figure 3: Constraint free target vessel type.

を、Fig. 2とFig. 3に示すような半無拘束型と無拘束型の水銀ターゲット容器構造による検討を進めた。ここで、これらの容器構造の設計と製作に必要ないくつかの検討項目とその内容を紹介する。

- 1) 半無拘束化(熱応力が高い前半部の拘束部の除去)と製作の実現化、または、無拘束化(水銀容器と保護容器の間の拘束部の除去)と製作の実現化
- 2) 半無拘束の場合には、後方のリブ部(リブ幅: 25mm, He層の狭い空間幅 3mm)での横打ちEBWがキー技術(Fig. 2中の赤色点線部)。なお、無拘束型は保護容器外側寸法が従来と同じの場合、内圧と熱変形による変位量が約2 mmとなり、規定(1mm)を超え、当初、半無拘束を選択
- 3) その後、水銀ターゲット容器とモデレーターの寸法

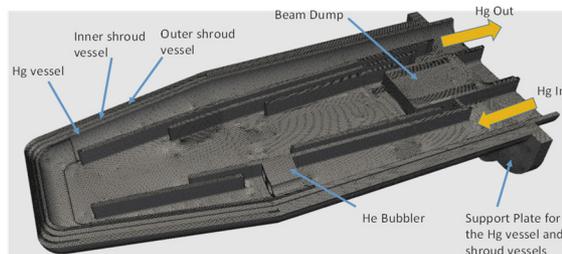


Figure 4: Cross section view of Hg target vessel (module). The yellow arrows in the figure indicated the mercury inlet and outlet directions. The support plate is fixed at the mercury vessel by TIG welding.

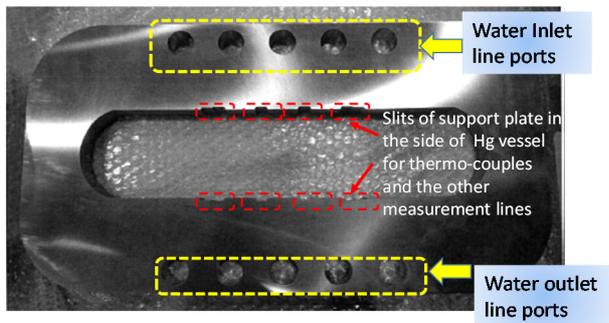


Figure 5: Photograph of a support plate of Hg target vessel (module) with slits of measurement lines and water line ports. The slits are prepared for thermos-couples lines and mercury leak sensor cables.

取合いのマージン詰めを進め、保護容器外側の仕切り板(Fig. 4 や Fig. 5 を参照)近傍に補強板を取付けることにより、容器強度を増加させ、無拘束型の構造強度が増加

4) 保護容器の内厚等の増による構造強度の増加が必要なため、水路構造の大幅見直しと製作方法の改良(ガンドリルなどによる水路の長穴加工)

5) 仕切り板(水銀容器と保護容器はこの板に接続)の計測線類ポートの切欠き窓の形状と配置の再検討

6) 仕切り板とビームダンプ付近の構造の見直し(水銀入口と出口の温度差による熱応力を低減).

7) 溶接時の熱変形量が小さい電子ビーム溶接法の併用の検討

最近、水銀ターゲット容器の様々な設計検討と製作性試験を進めた結果、拘束型や半無拘束型のものに比べて、熱応力の低下や溶接部の減少、及び組み立てのしやすさや検査のしやすさの点から、これまでの拘束型でなく、無拘束型の製作が進められることになった。現在、製作中の水銀ターゲット容器(11号機)の1例をFig. 6に示す。水銀容器と仕切り板を溶接した様子である。11号機や12号機の製作では、溶接時の熱変形を低減するため、TIG溶接だけでなく、電子ビームを併用した溶接法が採用されている。また、10号機では、TIG溶接の製作法で進めているが、開先形状の工夫や溶接条件の工夫により溶接熱変形と溶接欠陥をできるだけ抑えるようにしている。これらの水銀ターゲット容器は、溶接後、すべて非破壊検査を実施している。非破壊検査としてPT、RT、UTの3種類の検査をできるだけ実施している。また、運転時に熱応力が高い部位や領域においては、JISで規定されている欠陥判定法の1類より、厳しい判定法で検査を実施し、必要に応じて検出された欠陥を除去し、補修溶接を施し、再検査を実施している。

Table 2 に製作済と製作中の水銀ターゲット容器に対する内圧と熱応力から算出した構造強度上の安定運転出力の上限値の概算評価を示す。詳細な解析評価を進めているため、現段階では、参考値として見て頂きたい。8号機ではHeマイクロバブルを水銀の流動内で流し、耐キャビテーションの対策を施した。また、使用後の欠陥形成状態(主に水銀容器の内壁で生じるキャビテーショ



Figure 6: Hg vessel welded to the support plate. Two thermos-couples are set in the higher heating region due to spallation reaction of high energy protons and mercury on the mercury vessel.

ンによる容器損傷状態)などによる解析をさらに進めた上で、詳細な運転出力を定める予定である。2018年の秋からの運転には、8号機と同タイプの9号機が使用される予定である。また、より高出力の安定長時間運転が容器の構造強度上、期待される改良型の無拘束タイプの容器は、それ以降に供用される予定である。

Table 2: Fabrication Status of Hg Target Vessels (Modules)

No.	Structure type	Status	Upper limit for stable operation power
#9	Constraint (same type with #8), Next operation candidate	Fabricated	About 780-920 kW (tentative)
#10	Constraint Free between Hg vessel and shroud vessel	Under fabrication	About 1000 kW (tentative)
#11	Constraint Free	Under fabrication	About 800-1000 kW (tentative)
#12	Constraint Free	Under fabrication	About 1000 kW (tentative)

なお、水銀ターゲット容器の製作には通常、1年半以上の製作期間を要する。また、MLFの中性子源に供用期間は、機器の健全性を確保する点から、約1年ごとに交換している。このため、複数の容器の製作を並行的に進める必要がある。また、補足として、2018年7月3日に1MW相当運転[2]をJ-PARCのMLF施設で実施したが、この時、中性子源ターゲット容器で受けた出力値は、陽子ビームがミュオン標的をえているため、約920kWに相当する。

このような大強度出力(1MW)の長時間安定運転に向けたJ-PARC核破砕中性子源水銀ターゲット容器の最新の改良型設計を基に、その製作性の要素技術試験を経て実機への適用評価、欠陥検査などの評価を実施している。また、この過程で、疲労、照射損傷、水銀中のキャビテーション損傷などの試験、解析と評価を並行して進めている。このように、25Hz、3GeVの陽子ビームの下、1MWで長時間、安定に使用できるような水銀ターゲット容器の構造強度設計、製作技術(溶接技術含む)や検査技術などに関する全般の高度な工学技術の研究開発に努めている。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、J-PARCセンター内の研究者と技術者を始めとして、NAC等の専門部会での専門家、米国ORNLのSNSやオーストラリアのANSTOの専門家らと様々な議論を重ね、貴重なアドバイス等を頂いたことに感謝を申し上げます。また、本容器の製作や関係評価に係った三菱重工機械システム(株)、金属技研(株)、三菱重工(株)、アドバンスソフト(株)などの多くの関係者の皆様のご助力やご助言に感謝致します。

参考文献

- [1] H. Takada *et al.*, “Materials and life science experimental facility at the Japan Proton Accelerator Research Complex I: Pulsed spallation neutron source”, *Quant. Beam Sci.* 1, 2017, pp.1-26.
- [2] <https://j-parc.jp/ja/topics/2018/topics180705.html>
- [3] T. Wakui *et al.*, “Recent study for structural integrity evaluation and defect inspection of the J-PARC spallation neutron source target vessel”, *J. Nucl. Mater.*, 506, 2018, pp.3-11.
- [4] E. Wakai *et al.*, “Recent status of R&D in fabrication technology of mercury target vessel for high-intensity operation”, *Proceedings of The 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aug 2017, PASJ2017 THOL06, pp.166-169.
- [5] K. Haga *et al.*, “Technical investigation on small water leakage incident occurrence in mercury target of J-PARC”, *J. Nucl. Sci. Tech.*, 55, 2018, pp.160-168.
- [6] H28年度 JAEA-大阪大学の共同研究報告書, “高出力化に向けた核破砕中性子源水銀標的容器に関する溶接方法の基礎的研究”, 2017.
- [7] H29年度 JAEA-大阪大学の共同研究報告書, “核破砕中性子源水銀標的容器の大強度化対応のための溶接線近傍の割れ感受性および溶接時の力学特性に関する研究”, 2018.
- [8] W. Guan *et al.*, “Optimization study on structural analyses for the J-PARC mercury target vessel”, *Nuclear Inst. Method. in physical research A*, 894, 2018, pp.8-19.
- [9] T. Wakui *et al.*, to be presented in IWSMT14 held in Iwaki,

- Nov. 11-16th 2018.
- [10] E. Wakai *et al.*, to be presented in IWSMT14 held in Iwaki, Nov. 11-16th 2018.
- [11] H. Kogawa *et al.*, to be presented in IWSMT14 held in Iwaki, Nov. 11-16th 2018.
- [12] T. Naoe *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 468, 2016, pp.313-320.
- [13] S.J. Pawel *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 343, 2005, pp.101-115.
- [14] K. Farrell *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 343, 2005, pp.123-133.