

大強度化運転に向けた水銀ターゲット容器の製作技術に関する R&D の最近の状況

RECENT STATUS OF R&D IN FABRICATION TECHNOLOGY OF MERCURY TARGET VESSEL (MODULE) FOR HIGH-INTENSITY OPERATION

若井栄一^{#, A)}, 涌井隆^{A)}, 粉川広行^{A)}, 直江崇^{A)}, 管文海^{A)}, 羽賀勝洋^{A)}, 芹澤久^{B)}, 森裕章^{B)}, 堀口克彦^{C)}, 高田弘^{A)}, 安一三^{C)}, 楢田豊^{C)}, 李太玉^{D)}, 二川正敏^{A)}

Eiichi Wakai^{#, A)}, Takashi Wakui^{A)}, Hiroyuki Kogawa^{A)}, Takashi Naoe^{A)}, Wenhai Guan^{A)}, Katsuhiro Haga^{A)}, Hisashi Serizawa^{B)}, Hiroaki Mori^{B)}, Katsuhiko Horiguchi^{C)}, Hiroshi Takada^{A)}, Kazumi Yasu^{C)}, Yutaka Kushida^{C)}, Taiyu Li^{D)}, Masatoshi Fuatakawa^{A)}

^{A)} J-PARC Center,

^{B)} Osaka Univ.,

^{C)} Engineering Services Department, JAEA,

^{D)} Insight k.k.

Abstract

This paper was summarized recent R&D status in the design, fabrication technology and inspection method of mercury target module for high-intensity operation in a spallation neutron source of J-PARC. In 2015, two mercury target modules (#5 and #7) were damaged and water leak from safety hull was detected during the operation. Improved design of the mercury target module #8 and #9 was performed, and the fabrication of #8 will be finished up to middle of September in 2017. The operation of #8 will be started from this autumn. Further improved design and fabrication technology is under performing for 1 MW operation.

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き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施設(MLF)の中性子源システムは、2008 年より運転を開始した。これまで約 100~約 300 kW の 3 GeV の 25 Hz のパルス陽子ビーム下で安定運転を実施しており、1 MW での大強度運転が期待されている。約 300 kW の運転の実現には、二川らのキャビテーション研究[1, 2, 3]によって実現化したとも言える。これは陽子パルスビームに起因する励起圧力波の生成による、中性子源用水銀標的容器面内のキャビテーション損傷を抑制するため、マイクロバブル導入法を考案し、実機の水銀標的システムに反映させた結果、約 1/3 まで圧力波の影響を低下させた。また、水銀容器内部の先端部は低

温浸炭処理で表面硬化させ、キャビテーション損傷を 2 重の効果で抑えている[4]。これらの研究によって、約 300 kW まで安定した長期運転が可能となった。順調に大強度ビーム化の基盤が整備されたと思われたが、昨年度、陽子ビーム強度を 500 kW まで上昇させたところ、水銀標的容器の一部に損傷が発生した。この原因は照射損傷を含めた溶接部の熱応力増加や運転中の高サイクル疲労などが起因したと考えられる。このため、J-PARC では熱負荷が大きい領域の溶接部を減らす製作方法を考案するとともに、非破壊検査技術の改良等を行い、次年度の秋以降の運転で 500 kW の安定運転を目指して改良型標的容器の製作を進めている。

Figure 1 に水銀ターゲット容器(モジュール)のシステム概要図を示す。水銀ターゲット容器(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して冷却している。この容器は、現在、耐食性に優れた SUS316L 鋼で作製されている。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、容器表面を浸炭処理して懐食性能を高めている。水銀容器はビーム入射壁を 2 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たせ、最外層は循環水で冷却し、水銀容器と内保護容器の間は循環ヘリウムガスで冷却している。1 MW の運転時の発熱密度分布を Figure 2 に与え、Table 1 に運転時の水銀ターゲット容器(モジュール)の圧力や温度条件を示す。

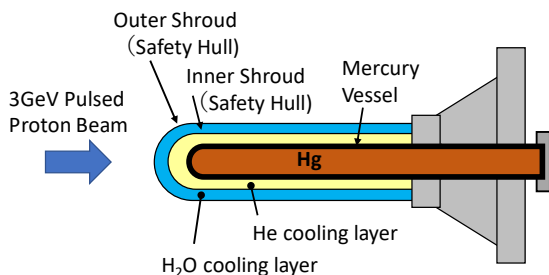


Figure 1: Schematic Structure Image of Mercury Target Vessel (Module).

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

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)	0.5 or 0.2*	25

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

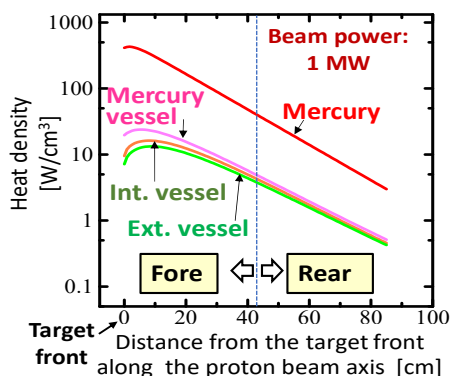


Figure 2: Heat density distribution in Mercury target vessel (module) under 1 MW proton beam power.

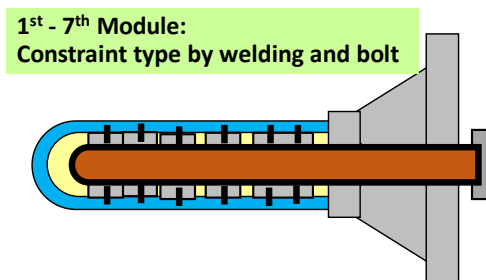


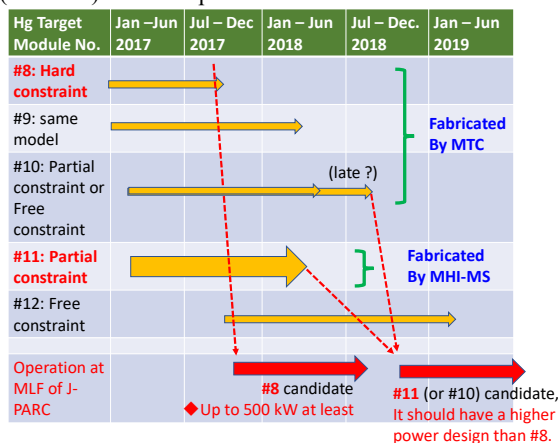
Figure 3: Schematic structure image of 1st - 7th Mercury target vessel (module).

2. 従来と今後のターゲット容器(モジュール)の構造の特徴と課題点について

水銀ターゲット容器(モジュール)は、運転中に発生する疲労(熱疲労:約2回/時間、水銀中の衝撃波:約25回/秒)や熱応力及び、高エネルギー陽子や中性子による照射損傷などを受ける。このため、このモジュールの構造と強度等を確保するため、多層の容器間をボルトで固定し、その近傍を TIG 等で溶接した構造を採用した(Figure 3 参照)。

2015 年に新しい水銀ターゲット容器(モジュール)(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た。この原因は水銀ターゲット容器のボルト構造に係る溶接部近傍において、運転中に容器内

Table 2: Schedule of Fabrication of Hg Target Vessels (Modules) and the Operation Plan



で発生する熱応力や高サイクル疲労などが起因した保護容器内で生じたき裂進展の損傷によるものと考えられる。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に実施後、500 kW で運転をしたが、比較的に短時間で破損が生じた。このため、同型の容器での安定運転のため、約 200 kW~150 kW の運転出力で 2017 年の夏まで運転を実施した。

2017 年秋から運転に供用するターゲットについては、水銀ターゲット容器(モジュール)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、容器の健全性をより詳しく調べるために、PT 試験、RT 試験、及び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徹底的に調べながら改良型標的容器の製作(Figure 4)を進めている[5, 6]。そして、秋以降の運転で段階的に出力を上げて 500 kW までの安定運転を行う計画である。

第8号機~第12号機に関する水銀ターゲット容器(モジュール)の製作スケジュールと運転計画を Table 2 に示す。今秋から来年の夏までの運転には第8号機が使用される予定になっており、順調に製作が進められている。第9号機は、第8号機と同タイプの構造を持つのに対して、第11号機は Figure 2 に示した核発熱が高い領域部

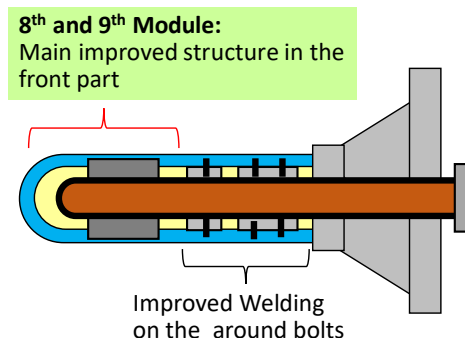


Figure 4: Improved structure image of 8th and 9th Mercury target vessel (module).

において、保護容器は水銀容器と接続しない構造を持っていて、Figure 5の上図のような半無拘束型ターゲット構造を持っている。このため、第11号機は第8号機や第9号機よりも高出力を期待でき、来年の秋以降の運転には第11号機が第一候補になっている。現在、さらに大強度運転を行っていくため、さらに改良した無拘束型ターゲットの開発を進めている。

第11号機の開発を進めるに当たっては、運転時に発生する応力を低減するためのモデル構造の検討を行い、熱負荷が高い領域から水銀容器と保護容器の間のリブを除去した半無拘束型ターゲットの設計を進め、その製作技術の実証を実施した(Figure 6参照)。

ここでの設計の主な考慮点は以下のとおりである。陽子ビームのトリップ等により、繰り返しの高い応力が負荷されるが、1時間当たり2回のビームトリップを想定して運転時間を5,000時間と仮定した場合、 10^4 回の熱疲労が生じる。JIS圧力容器の設計疲労曲線から1MWの運転時に発生する熱応力の許容値は883MPaとなる。このような条件の下、半無拘束型ターゲットの構造モデルを有限要素解析によって評価した。また、製作技術においては、Figure 6に示すように、水銀容器と保護容器を繋ぐ部分(リブ)は溶接によって製作するが、この時に生じる熱変形や

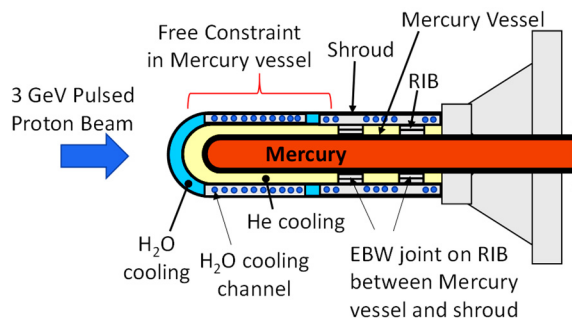


Figure 5: Conceptual structure of improved mercury vessel (module).

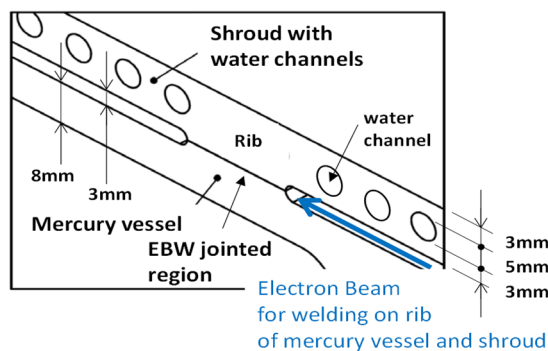


Figure 6: Schematic image of main validation tests of fabrication technology (EBW and water channel cutting by gun drill) for mercury target module with partial constraint free.

残留応力を低下させるため、リブに対して電子ビーム溶接(EBW)法による製作実証試験を行った。また、保護容器はこれまで2枚の板をリブで接続する構造とし、水路を構成していたが、保護容器の強度向上と製作性を高めるため、水路構造の加工はガンドリルによる穴あけ方式によってその製作技術実証を行った。

半無拘束型ターゲットの構造モデルに対して、仔細な構造を検討した結果、1MW運転時の熱応力の最大値が約700MPaとなり、設計条件を十分に満足する結果を得た。また、製作実証試験では、Figure 6のような狭い領域のリブ部の電子ビーム溶接を実施した結果、表面近傍以外で良好な溶接状態であることが確認された。スパッタなどが観察された表面領域は、溶接後にワイヤーカット加工によって欠陥部を除去することとした。また、水路加工に対してガンドリルなどによって穴径が $\phi 5$ mm以上であれば、500mmを超える長穴に対しても、良好な加工(加工段差0.2mm以内、曲がり0.15mm以内)ができることが分かった。これらの製作技術の実証試験の結果から、半無拘束型ターゲット容器(モジュール)の製作に関する必要な技術的な目途を得ることができた。

11号機の契約は2017年2月に行い、本構造モデルの構築がほぼ完了した。7月末までに水銀容器図面を完成し、製作は8月から実施し、2018年1月末までに水銀容器の製作と保護容器の製作及び一体化製作、及び検査を完了させる予定である。その後、水銀着脱機構の取り付けや他の部品取り付けなどを行い、2018年3月末に11号機が完成する予定となっている。

無拘束型ターゲットの製作の見通しについては、これまで検討を進め、従来のターゲット容器や半無拘束型ターゲット容器よりも、運転時の熱応力が低減できることが分かっている。また、無拘束型ターゲットは水銀容器と保護容器が製作時に分離した構造になるため、容器の内外部の検査がよりやりやすくなるメリットがある。次期ターゲット製作に採用する予定である。

3. 大強度化に向けたさらなる検討事項

製作時に特に注意すべき点として、溶接時の高温割れがある。素材的に事前に防止しなければならない点である。この高温割れの防止の点で、素材のCr等量/Ni等量比に注意している。Hammarら[7]が1979年に評価したこれらの等量値を用い、Cr等量として、 $Cr = Cr + 1.37Mo + 1.5Si + 2Nb + 3Ti$ とし、Ni等量として、 $Ni = Ni + 0.31Mn + 22C + 14.2N + Cu$ とする。高温割れが発生しないようにするには、Cr等量/Ni等量比は1.55以上のものである素材の使用が基本的に必要になる。可能であれば、1.60以上のものが望ましい。また、不純物のPとSについても、同様な溶接時の高温割れを防止する観点から、低濃度の材料を選択する必要がある。11号機に使用するSUS316L鋼について、これらの点を注意している。才田[8]のステンレスの溶接性の解説にも類似の内容が紹介されている。

現在、水銀ターゲット容器やその保護容器の素材には、耐食性能を考慮して、SUS316L鋼が使用されている。この材料は、耐食性を向上させるために、炭素濃度を

0.03wt%以下(SUS316 鋼では、炭素濃度は 0.08wt%以下)にしている。ただし、この材料は SUS316 鋼の耐力($S_y=205 \text{ N/mm}^2$ 以上)と引張強さ($S_u=520 \text{ N/mm}^2$ 以上)よりやや強度が低い($S_y=175 \text{ N/mm}^2$ 以上、 $S_u=480 \text{ N/mm}^2$ 以上)。強度の向上を求める場合には、SUS316LN 鋼が有望である($S_y=245 \text{ N/mm}^2$ 以上、 $S_u=550 \text{ N/mm}^2$ 以上)。材料の製作基準から、設計応力強さが SUS316L に比べて 40%増加する。SUS316LN 鋼は、過去にコルスタライジング特性も含めて、様々なデータが取得されている。

大強度ビーム下での安定運転には、水銀中で発生するキャビテーションによる内壁損傷の抑制が一番のキーファクターと考えられている。これまで以上に、バブラーによるバブル導入効果(サイズや密度制御などを含む)、流速制御によるバブルの変形効果、壁面の硬化処理(コルスタライジング)効果等の研究を進展させ、損傷の予測法の高度化及び、抑制法の高度化の両方から研究を進めていくことが不可欠であると考えられる。

謝辞

水銀ターゲット容器の製作において、8号機と9号機の製作では、金属技研(株)の鹿又研一氏と島田翼氏らの精力的な取り組みが行われており、数多くの議論を重ねて協力して製作と評価を進めている。彼らの努力に深く感謝している。また、11号機の製作と評価に関しては、三菱重工メカトロシステムズ(株)の木村優志氏、上羽亮平氏、岡田真治氏、仙入克也氏、大久保光一氏らの深い考察力と様々な努力の下、半無拘束型ターゲットの製作の見通しが得られている。彼らの努力に深く感謝している。

参考文献

- [1] M. Futakawa, H. Kogawa, S. Hasegawa, Y. Ikeda, B. M. Wendel, J. Haines, G. Bauer, T. Naoe, K. Okita, A. Fujiwara, Riemer, Y. Matsumoto, N. Tanaka, Cavitation damage prediction for spallation target vessels by assessment of acoustic vibration, *J. Nucl. Mater.*, 377(2008), pp.182-188.
- [2] M. Futakawa, H. Kogawa, S. Hasegawa, T. Naoe, M. Ida, K. Haga, T. Wakui, N. Tanaka, Y. Matsumoto, Y. Ikeda, Mitigation technologies for damage induced by pressure waves in high-power mercury spallation neutron source (II) -bubbling effect to reduce pressure wave-, *J. Nucl. Sci. Tech.*, Vol. 45, No. 10 (2008), pp.1041-1048.
- [3] M. Futakawa, Proton Bombardment in Mercury Target for Neutron Production - Impact dynamics on interface between liquid and solid metals -, *Applied Mechanics and Materials* Vol. 566 (2014) pp 26-33.
- [4] 直江 崇, 粉川広行, 涌井 隆, 二川正敏, 竹内博次, ピッチング損傷を受けた表面改質処理ステンレス鋼の曲げ疲労強度, *材料*, Vol. 57 No. 6(2008), pp.576-582.
- [5] 若井栄一、他、"J-PARC核破砕中性子源の水銀標的容器に対するフェーズドアレイ超音波探傷器などの非破壊検査による欠陥調査研究", 日本非破壊検査協会秋季講演会(仙台市)2016年10月6-7日。
- [6] T. Wakui, E. Wakai *et al.*, "Structural Integrity Investigation of JSNS Mercury Target Vessel by Nondestructive Inspection", 13th International Workshop on Spallation Materials Technology(IWSMT-13), 2016 10/30-11/4, USA.

- [7] O. Hammar, and U. Svensson, Influence of steel composition on segregation and microstructure during solidification of austenitic stainless steels. *Proc. Conf. Solidification and Casting of Metals*. Hunt, Ed., pp. 401-410. 1979. The Metals Society, London, England.
- [8] 才田一幸、ステンレス鋼の溶接性、溶接学会誌 第 79 巻 (2010)第 6 号, pp/40-50.