

廃棄物焼却発電の高温高压化における回転ストーカ炉・ロータリージョイントの構造検証

Structural Verification of Rotary Stoker and Rotary Joint under High-Temperature and High-Pressure Conditions in Waste-to-Energy Plants

前田健一^{*}技術士(上下水道部門)・梶原康司^{*}・梶原吉郎^{**} 技術士(衛生工学部門)・若松秀樹^{***}技術士(衛生工学部門)・島 孝一^{****}

Kenichi Maeda・Yasushi Kajiwara・Yoshio Kajihara・Hideki Wakamatsu・Koichi Shima

廃棄物焼却発電設備においてボイラ水配管から、回転ストーカ（以下 RC）を構成する水管に循環水を分配する装置がロータリージョイント（以下 RJ）である。現設計の RJ は約30年前に10 MPa × 300℃を想定して開発された。開発当初に得られた知見が現設計に適用されており、シール性能の高い海外製のグランドパッキン（以下 GP）や、グランドシール部へのクロムメッキ処理を必要としている。

今回の検証により、安価かつ短納期である国産 GP で、同等のシール性を確保できることが見出された。また、試験期間を通じてクロムメッキなしでもスティックスリップ現象^{*}は起こらず、機械加工のみでも問題ないことを確認した。

※スティックスリップ現象：摩擦面で固着と滑りが交互に発生することによる振動現象

In waste-to-energy incineration power plants, the rotary joint (RJ) is a device that distributes circulating boiler water from the boiler water piping to the water tubes that constitute the rotary stoker (RC). The current RJ was originally designed about 30 years ago for operating conditions of 10 MPa and 300℃. The design continues to reflect the engineering knowledge established at the time of its initial development. Therefore, it requires the use of high-performance imported gland packing (GP) and chromium plating on the gland sealing surface to maintain adequate sealing performance.

The present study demonstrated that a domestically manufactured GP, which is more cost-effective and available within shorter lead times, can achieve sealing performance equivalent to that of the imported GP. In addition, no stick-slip phenomenon was observed throughout the test period, even in the absence of chromium plating, indicating that satisfactory performance can be achieved with a machined sealing surface alone. These results demonstrate the feasibility of cost reduction through the adoption of these measures.

Key Words :

ロータリージョイント	rotary joint
グランドパッキン	gland packing
スティックスリップ	stick-slip

【セールスポイント】

- ・ 価格、入手性が課題であった従来の海外製 GP と安価、短納期である国産 GP の漏洩蒸気量を比較した結果、海外製 GP 平均28.6 L/h に対して、国産 GP 平均18.7 L/h と国産 GP の方が少なかった。
- ・ クロムメッキを施工しない二重連絡管でもスティックスリップによる騒音が発生しないことも確認し、LCC、EPC コストの低減が現実的となった。

^{*}エンジニアリング本部 技術部 プラント技術室 機能開発グループ ^{**}エンジニアリング本部 技術部 プラント技術室 基本計画グループ

^{***}エンジニアリング本部 技術部 プラント技術室 装置技術グループ ^{****}CS 本部 アフターサービス部 設備改善技術室

まえがき

近年、廃棄物焼却発電設備においてボイラの高温・高圧化が進展しており、当社においても常用圧力6 MPa、450℃の蒸気条件が採用されている。回転ストーカ炉はボイラ水管構造であり、RJを介してボイラ飽和水を冷却水として循環させている¹⁾。RJは約30年前（IHI 当時）に10 MPa×300℃を想定して開発されたが、蒸気条件の高温高圧化に伴い、実機条件に即した性能評価が求められている。RJは軸受およびシール装置から構成され、構造上、図1のように一定量の蒸気漏れを許容する設計となっている。

シール装置にはGPを採用しているが、従来は海外製品を使用しており、価格および入手性が課題であった。さらに、軸とGPの摺動部におけるスティックスリップ現象に起因する騒音対策として、二重連絡管表面にクロムメッキが施されており、コスト増加要因となっていた。

これらの課題を踏まえ、本開発では実機同等サイズの試験装置を製作し、技術研究所において実証試験を実施した。本報では、本試験で実施した漏洩蒸気量の定量測定結果、ならびにコストダウンの検証と効果について報告する。

写真1に本試験装置の全景を示す。試験は、当社技術研究所にて実施した。本試験装置は、第一種圧力容器に該当するため、構造検査、設置届および落成検査などの対応が必要であった。安全弁の設定圧は8.2 MPa(G)とした。

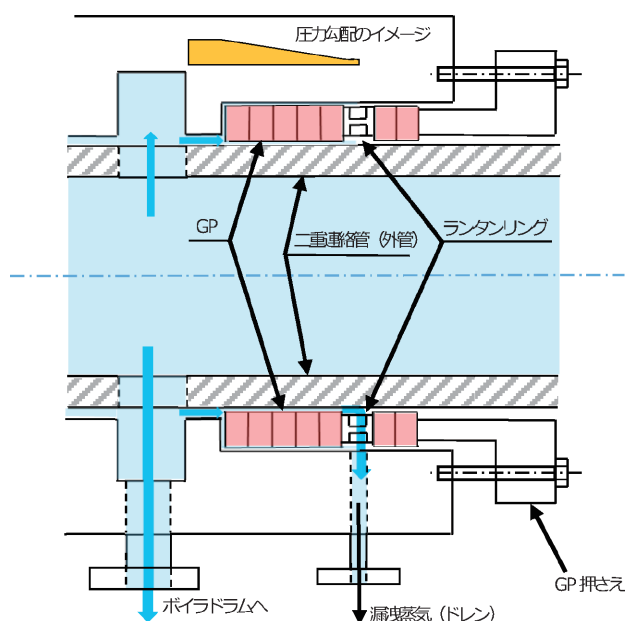


図1 GP部ランタンリングからの漏れ

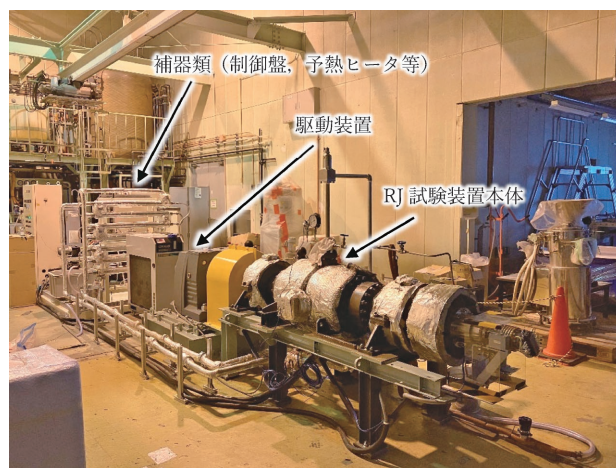


写真1 試験装置全景

1. RJ 実証試験装置

1.1 試験装置フロー

図2にRC炉の全体構成を示す。固定配管から供給されたボイラ水は、RJから連絡管に導かれて、炉壁水管内を循環し、再び二重連絡管、RJを経由して固定配管に導かれる。

図3に試験装置フローを示す。今回の試験は二重連絡管とRJとのシール部の検証を目的として実施したものである。そのため、連絡管は外径および材質を実機と同一とした上で、形状については二重管とせず単管（ドラム）で模擬し、回転数は実機に合わせて0.03 rpmとした。また、トルクについても実機と同等となるようモータおよび減速機を選定した。さらに、実機と同様のシールを前後二箇所にて設け、漏洩蒸気量を測定するために凝縮器を設置した。

圧力、温度はそれぞれ水供給高圧ポンプ、ならび

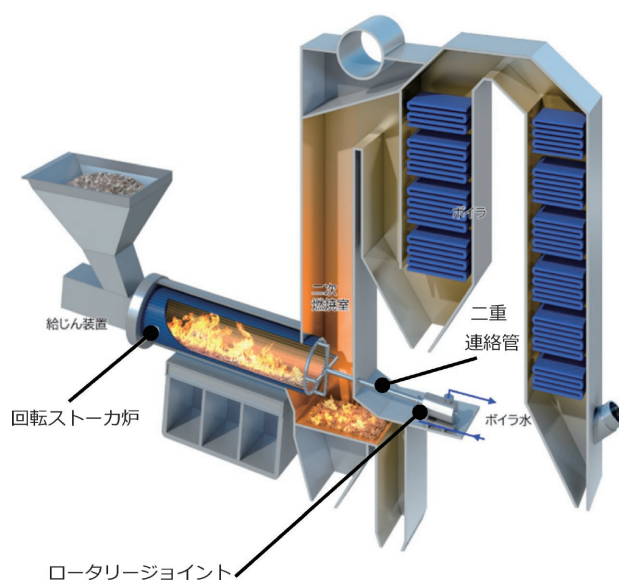


図2 実機ロータリージョイント位置図

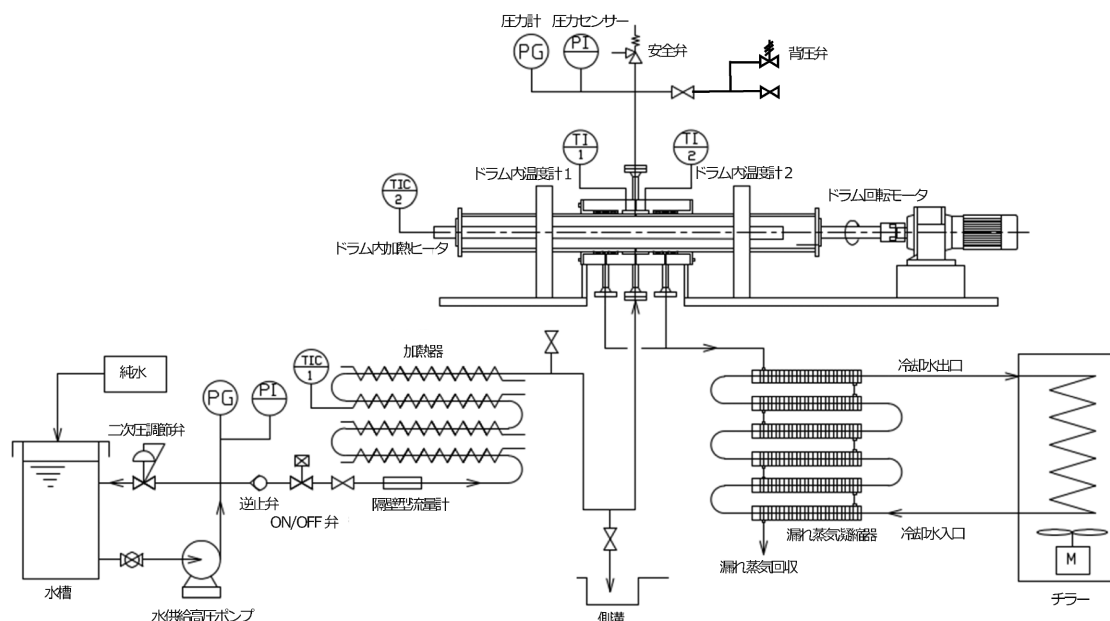


図3 試験装置フロー

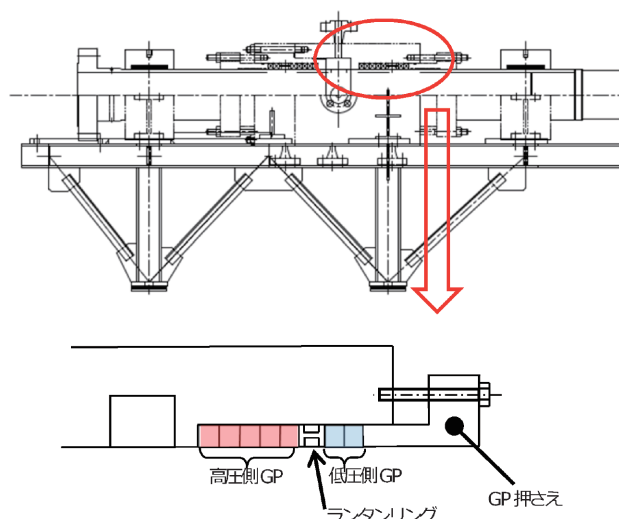


図4 GP 取付部

にドラム端部フランジに取り付けたヒータにより、実機相当まで昇圧および昇温した。

1.2 GP 取付部

図4はGP取付部を簡略的に図示したものである。実機と同じく、片側7本のGPを左右2箇所に設置した。

奥側が高圧側で5本、ランタンリングを挟んで手前側が低圧側で2本取付けた。ランタンリングを挟むことにより、外部にある程度の蒸気を漏洩させ、低圧側から炉室内に蒸気が漏れることを防止している。

2. 漏洩蒸気定量試験

海外製 GP と国産 GP の漏洩蒸気量を測定して比較した。

表1 海外製 GP 漏洩蒸気定量試験条件

RUN No.	設定温度 (°C)	実測平均漏温度 (°C)	設定圧力 (MPa)	実測平均圧力 (MPa)	軸回転数 (r.p.m.)	漏洩蒸気量 (kg/h)	備考
1-1	270	268.1	7.2	7.17	0.03	24.1	
1-2		267.9		7.16		27.4	
1-3	275	272.8		7.17		28.0	
1-4		275.9		7.23		29.2	
1-5	280	275.5		7.24		35.5	
1-6		268.4		7.17		30.3	
1-7	255	254.0	6.0	5.99	0.12	26.5	
1-8	262	259.8	6.4	6.33		29.1	
1-9	266	265.8	6.8	6.75		27.0	
1-10	270	268.0	7.2	7.19		30.2	加速試験
1-11		267.2		7.16		28.0	
1-12	(常温→) 270	267.3		7.20	0.03 (→0.01)	28.5 (主条件分のみ)	常温高圧試験も実施

2.1 漏洩蒸気定量試験 Run 1 (海外製 GP)

2.1.1 試験条件 (海外製 GP)

従来品の海外製 GP を使用した漏洩蒸気定量試験の条件を表1に示す。設定圧力は7.2 MPa(G)、設定温度は270℃をベースにして試験した。

試験圧の7.2 MPa(G)は、6.0 MPa、450℃ボイラの蒸気ドラムの最高使用圧力(高質ごみ)6.81 MPaに、ボイラ循環水ポンプの吐出圧0.37 MPaを加えた値が7.18 MPaになることから決定した。

7.2 MPa(G)の飽和温度は、約289℃であり当初、設定温度280℃にて試験を実施したが、当該温度付近で、安全弁が度々作動したことから、飽和温度より低い設定で試験を行った。

2.1.2 試験結果 (海外製 GP)

海外製 GP での漏洩蒸気定量試験の結果を図5に示す。試験条件表1の通り、温度は254.0～275.9℃、圧力は5.99～7.24 MPa(G)の範囲で変化させたが、

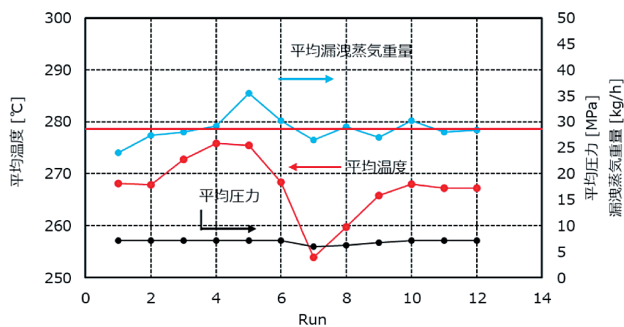


図5 漏洩蒸気量定量試験結果（海外製 GP）

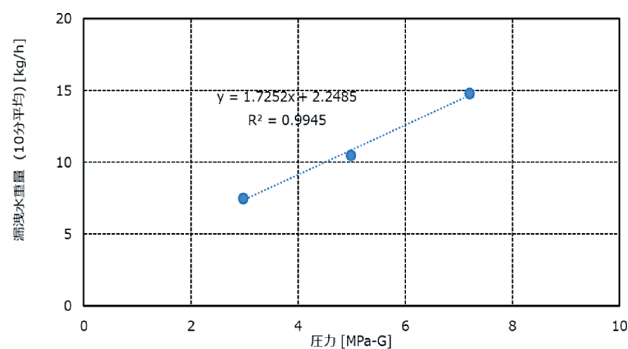


図8 常温高压試験漏洩水量試験結果

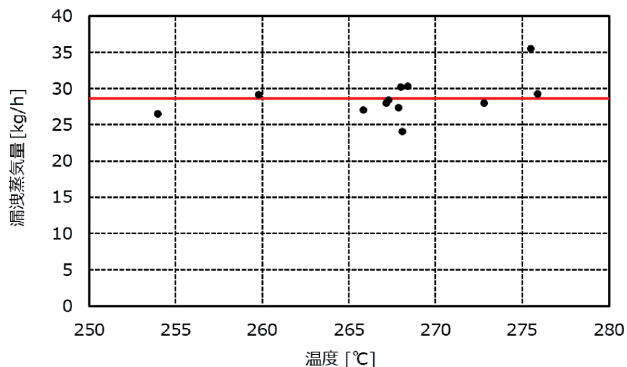


図6 漏洩蒸気量定量試験結果（海外製 GP）
（温度と漏洩蒸気量の関係）

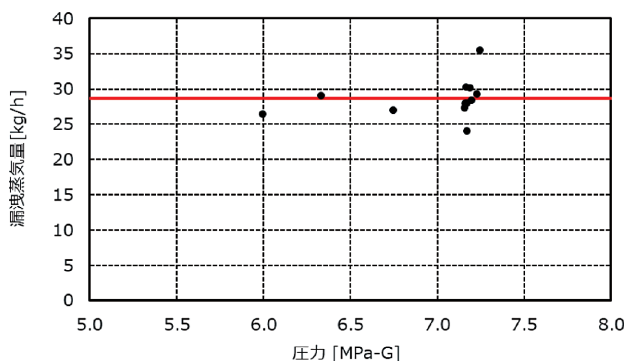


図7 漏洩蒸気量定量試験結果（海外製 GP）
（圧力と漏洩蒸気量の関係）

漏洩蒸気量は、平均28.6 L/h となった。

図6は温度と漏洩蒸気量の関係、図7は圧力と漏洩蒸気量の関係を示す。上記の範囲では温度、圧力を変化させても漏洩蒸気量に大きな変化はなかった。

2.1.3 常温高压試験

GP の特性を調査するためにヒータを使用せずに圧力のみ高めた試験を実施した。図8に常温高压試験時の圧力と漏洩水量の関係を示す。高温高压の場合と異なり、常温では、圧力と GP 漏洩水量は比例関係になった。

表2 国産 GP 漏洩蒸気量定量試験条件

RUN No.	設定温度 (°C)	実測平均温度 (°C)	設定圧力 (MPa)	実測平均圧力 (MPa)	軸回転数 (r.p.m.)	漏洩蒸気量 (kg/h)	備考
2-1	250	248.4	7.2	7.19	0.03	35.2	
2-2		249.7		7.19		11.7	
2-3		249.7		7.19		13.4	
2-4		249.2		7.19		16.6	
2-5	235	234.5	6.0	5.97		13.9	
2-6	240	239.3	6.4	6.38		19.7	
2-7	245	243.9	6.8	6.78		19.2	
2-8	250	248.7	7.2	7.18		19.7	

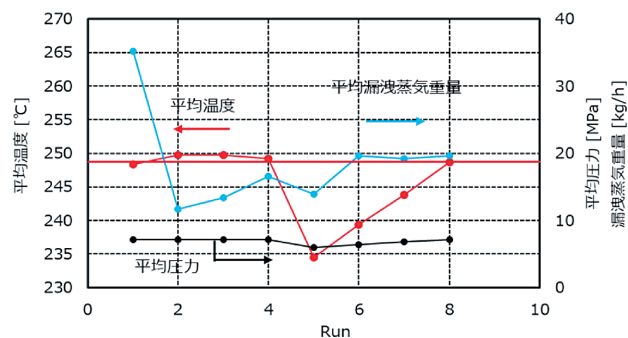


図9 漏洩蒸気量定量試験結果（国産 GP）

2.2 漏洩蒸気量定量試験 Run 2（国産 GP）

2.2.1 試験条件（国産 GP）

海外製 GP の次に国産 GP を使用して漏洩蒸気量定量試験を実施した。試験条件を表2に示す。設定圧力は、海外製 GP と同じ7.2 MPa(G)をベースとした。

試験温度は、海外製 GP と同じ270℃では、安全弁が作動するトラブルが解決していなかったため、250℃ベースに変更した。

2.2.2 試験結果（国産 GP）

国産 GP での漏洩蒸気量定量試験の結果を図9に示す。初日の漏洩蒸気量は、1日を平均すると35.2 L/h と、海外製 GP に比べてやや多かったが、試験開始後3.5 h までは漏洩蒸気量は60 L/h 程度であったものが徐々に低下して、試験終了時には10 L/h 程度まで下がった。GP が馴染んだことが漏洩蒸気量

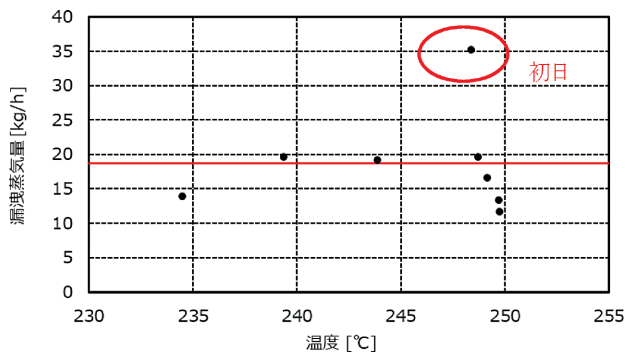


図10 漏洩蒸気量定量試験結果（国産 GP）
（温度と漏洩蒸気量の関係）

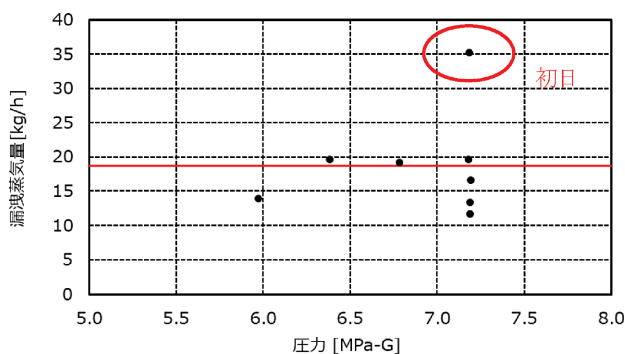


図11 漏洩蒸気量定量試験結果（国産 GP）
（圧力と漏洩蒸気量の関係）

が低下した原因と考えられる。

試験条件表 2 の通り、温度は 234.5 ～ 249.7℃、圧力は 5.97 ～ 7.19 MPa(G) の範囲で変化させたが、初日も含めた漏洩蒸気量は、平均 18.7 L/h となった。これは、従来の海外製 GP の平均 28.6 L/h よりも少ない漏洩量であった。

図10は温度と漏洩蒸気量の関係、図11は圧力と漏洩蒸気量の関係を示す。上記の範囲では海外製 GP と同様に温度、圧力と漏洩蒸気量の間に明確な相関関係は見出せなかった。

3. クロムメッキ施工の要否確認

本試験では、海外製 GP、国産 GP とともに二重連絡管を模擬したドラムは、機械加工（表面粗さ = 1.6 μm）を行ったのみで、クロムメッキは施工していなかったが、試験期間を通じてスティックスリップ現象は 1 度も起きなかった。

軸回転時と軸停止時の等価騒音レベルを測定した結果を表 3 に示す。軸停止時と軸回転時の等価騒音レベルの差は、1 dB 以下でありスティックスリップによる騒音が発生していないことが数値でも確認出来た。

クロムメッキを施工しなくてもスティックスリップによる騒音が発生しなかった要因としては、GP

表 3 騒音測定結果（クロムメッキ施工なし）

GP名	測定日	実験圧力 (MPa)	実験温度 (℃)	回転数 (r.p.m.)	等価騒音レベル LAeq(dB)	軸停止等価騒音レベル LAeq(dB)	ΔL (dB)
GrafolanHT6570 +T/#9077-L	'26/1/30	7.2	270	0.1	65.2	64.9	0.3
	'26/2/3	7.2	270	0.03	70.6	70.2	0.4
パルカー 6399R+VF22R	'26/3/11	7.2	250	0.03	71.3	71.0	0.3

締付方法の確立、GP 性能の向上、二重連絡管表面の機械加工精度が向上したことが挙げられる。

4. コストダウン試算

国産 GP の漏洩蒸気量平均値は、18.7 L/h であり、従来の海外製 GP の 28.6 L/h と比較して少なかった。また、クロムメッキを施工しない二重連絡管でもスティックスリップによる騒音は発生しなかったため、国産 GP 採用による LCC 低減と、クロムメッキ不要による EPC コスト低減が現実的となった。

処理規模 150 t/d ・ 炉、ボイラ 6 MPa の 2 炉、運営期間 20 年でコストダウンの試算を行った結果、EPC コスト削減額は、7 200 千円 / 2 炉、LCC 削減額は、11 100 千円 / 20 年 ・ 2 炉と算出された。

5. RJ 漏洩蒸気への油分の混入

5.1 RJ 漏洩蒸気凝縮水の油分分析

RJ 漏洩蒸気の凝縮水には、GP に含浸された油分が混入する。凝縮水の適正処理のため、今回の試験で生じた凝縮水中の油分についても分析を行った。

表 4 に海外製 GP の終了時、国産 GP の開始時と終了時のヘキサン抽出物質の分析結果を示す。国産 GP 使用時の漏洩蒸気へのヘキサン抽出物質は、試験開始時 92 mg/L に対して、終了時には 1.2 mg/L、海外製 GP では、終了時のデータのみであるが 3.6 mg/L まで低下していた。経過日数の増加に伴い、検出下限未満まで低下することも考えられ、一定期間経過後は特段の処理を行わずに再利用水として使用できる可能性が示唆された。

5.2 GP 含油量の分析

漏洩蒸気への油分の混入は、GP のどの箇所から漏出したものか確認するために試験終了後の GP を取出し、含油量の分析を行った。サンプリング箇所は図12上段の軸側、中間部、外側と下段の GP 位置の組合せとした。分析結果を表 5 に示す。

表 4 漏洩蒸気凝縮水中の油分の推移

試料名	採水日	試験経過日数	ヘキサン抽出物質 (mg/L)
海外製GP終了時	'26/2/3	13	3.6
国産GP開始時	'26/3/2	1	92
国産GP終了時	'26/3/11	8	1.2

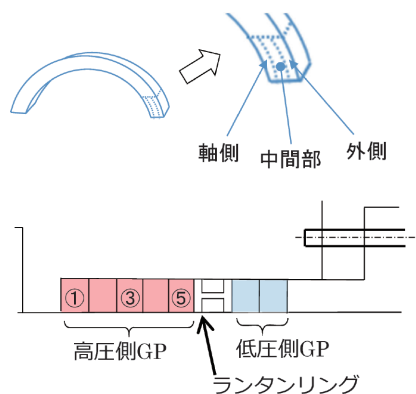


図12 GP サンプルリング箇所

表5 GP の含油量分析結果

試料名		含油量(wt%)
新品		3.8
終了時① 高圧側 最内側	軸側	0.47
	中間部	0.03
	外側	0.79
終了時③ 高圧側 中間部	軸側	2.1
	中間部	1.9
	外側	2.2
終了時⑤ 高圧側 最外側	軸側	1.1
	中間部	1.1
	外側	1.3

分析結果から最上流側に位置する最内部の含有量が最も低下していた。また軸側、中間部、外側の別では、特に①では中間部が最も含有量が低下していた。軸側、外側から油分が流出すると内部から油分が供給されるようになっていると考えられる。

6. 海外製 GP と国産 GP の比較まとめ

海外製 GP と国産 GP の比較評価をまとめて表6に示す。国産 GP は、これまで当社が標準的に採用していた海外製 GP よりもメリットが多かった。ただし、今回は試験期間が短く、長期的な評価については実機での運用を通じて検証する必要がある。

表6 海外製 GP と国産 GP の比較評価

項目	海外製 GP	国産 GP
価格	高価	安価
入手性	長納期	短納期
蒸気漏洩量	平均 28.6L/h	平均 18.7L/h
騒音性	スティックスリップ発生無	スティックスリップ発生無
運転実績	当社実績多数	実績無
漏洩蒸気凝縮水中の油分	3.6mg/L (13日後)	1.2mg/L (8日後)

む す び

RC 炉に循環水を分配する装置である RJ の GP は、これまで海外製のため価格と入手性が課題であった。本試験では、安価で入手性の良い国産 GP での蒸気漏洩量を測定し、従来の海外製 GP での蒸気漏洩量と比較した。結果は、海外製平均 28.6 L/h、国産 GP 平均 18.7 L/h となり国産 GP の方が少ない結果となった。

また、スティックスリップによる騒音発生を抑えるために、これまで二重連絡管にはクロムメッキが施工されてきた。本試験においてクロムメッキを施工しない二重連絡管を模擬したドラムで試験し、スティックスリップによる騒音が発生しないことを確認した。

以上のことより、国産 GP 採用による LCC 低減と、クロムメッキ不要による EPC コスト低減が現実的となった。

さらに漏洩蒸気凝縮水中の油分の分析を行い、試験の経過に伴い、油分が低下することを確認した。このため一定期間経過後は特段の処理を行わずに再利用水として使用できる可能性が示唆された。

【参考文献】

- 1) 成澤道則：神鋼環境ソリューション技報 vol.15 No.2, (2019/3)