

ガラス固化技術開発施設(TVF)における固化処理状況について

— 運転再開に向けた対応状況 —

【概要】

○加熱コイル内径拡大試験において、内径を $\phi 90$ mm に拡大した場合、解析結果と同様に加熱電力を約 15%増加することで、既設の加熱コイル(内径 $\phi 80$ mm)と同等の温度分布が得られることを確認した(内径 $\phi 80$ mm で 13 kW→内径 $\phi 90$ mm で 15 kW)。

また、流下ノズルの傾きや絶縁材の有無により、流下ノズル表面の温度分布に影響は生じないことを確認した。

令和2年6月8日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

加熱コイル内径の拡大に関する加熱性確認試験について

1. 概要

ガラス固化技術開発施設(TVF)の溶融炉の流下ノズル加熱装置において、流下中に漏電リレーが作動し流下が停止した事象の原因は、流下ノズルに傾き等を生じ、加熱コイルと接触することにより、漏電リレーが作動したものと判断した。この対策として、流下ノズルと加熱コイルのクリアランス約 10mm を確保するため、加熱コイル内径を既設の $\phi 80$ mm から $\phi 90$ mm に拡大し、加熱コイル中心を 5 mm オフセットすることとした。

加熱コイル内径を拡大した場合、同じ高周波加熱の入力電力(電流)では流下ノズルの発熱量が低下することが分かっており、既設の加熱コイル(内径 $\phi 80$ mm)と同等の発熱量を得るために必要となる高周波加熱の入力電力(電流)を解析により確認した。

流下ノズルの温度分布については、モックアップ試験により、既設と同じ内径の加熱コイル(内径 $\phi 80$ mm)で加熱した場合の温度分布と比較する方法で加熱コイル内径の拡大、流下ノズルの位置ズレ、絶縁材の有無の影響を確認した。

解析及び試験の結果、以下を確認した。

○ 解析の結果

- ・ 加熱コイル内径を $\phi 80$ mm から $\phi 90$ mm に拡大した場合、高周波加熱の入力電力を約 15 %増加させることにより、同等の流下ノズルの発熱密度(発熱量)が得られることを確認した。

○ 試験の結果

- ・ 加熱コイル内径を $\phi 80$ mm から $\phi 90$ mm に拡大し、流下ノズルの位置ズレ及び絶縁材を取付けた場合においても同等の流下ノズルの温度分布が得られることを確認した。なお、この時の高周波加熱の入力電力は、解析結果と同様に約 15 %増加することを確認した。

高周波加熱の入力電力の約 15 %増加(約 13 kW→約 15 kW)は、既設の流下ノズル加熱装置電力盤の仕様内(出力電力:22 kW)であり、流下ノズルの位置ズレや絶縁材の有無に関わらず同等の流下ノズルの温度分布が得られることから、対策後においても流下可能と判断した。

これらを踏まえ、加熱コイル内径 $\phi 90$ mm で結合装置の製作を進めている。

2. 解析について

加熱コイルの内径を既設の $\phi 80$ mm から $\phi 90$ mm に拡大した場合、既設の加熱コイルと同等の発熱量を得るために必要となる高周波加熱の入力電力(電流)を解析により確認した。

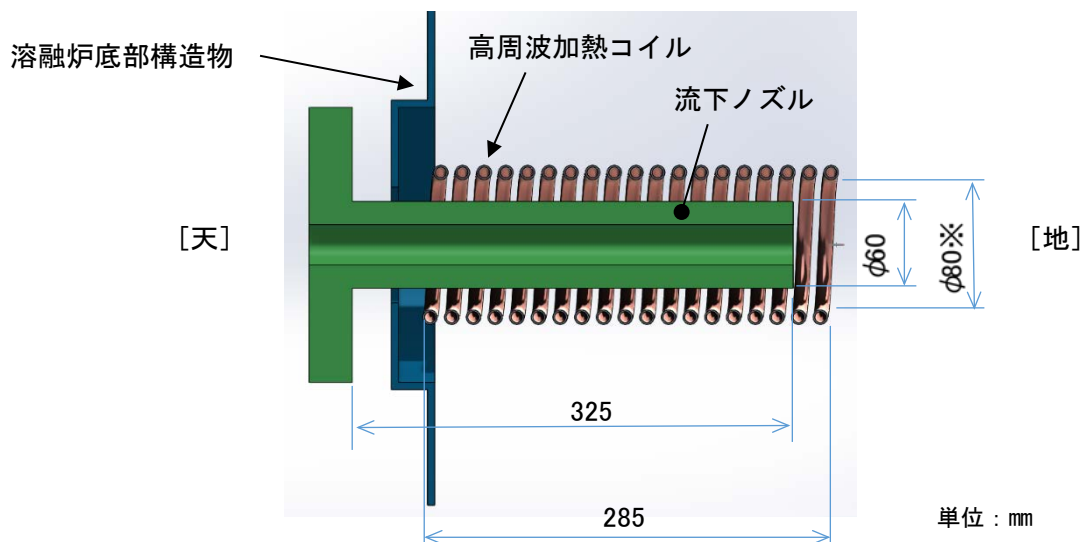
2.1 解析条件及び解析モデル

解析条件を表-1、解析モデルを図-1 に示す。

解析は、汎用の電磁界解析コード JMAG(日本総合研究所:現 JSOL)を使用した。

表-1 解析条件

| 項目 | 条件 | 備考 | |
|---------|------|---|---------------------------------------|
| 加熱コイル | 寸法 | 内径: $\phi 80$ mm、 $\phi 90$ mm、 $\phi 100$ mm、 $\phi 120$ mm 長さ: 285 mm | ・内径: 既設は $\phi 80$ mm。 ・長さ: 既設と同じ。 |
| | ターン数 | 19 | ・既設と同じ。 |
| | 材質 | 銅 | ・既設と同じ。 |
| 流下ノズル | 寸法 | 外径: $\phi 60$ mm 内径: $\phi 28$ mm 長さ: 325 mm | ・既設と同じ。 |
| | 材質 | インコネル 690 | ・既設と同じ。 |
| | 位置 | 加熱コイルの中心 | |
| 高周波加熱入力 | 電力 | 13 kW | ・リファレンスケース(加熱コイル内径 $\phi 80$ mm)の値。 |
| | 電流 | 240 A | |
| | 周波数 | 2.8 kHz | ・設計仕様は 2.0~3.0 kHz。 |



※ 解析ケースにより、 $\phi 80$ mm、 $\phi 90$ mm、 $\phi 100$ mm、 $\phi 120$ mm とする。

図-1 解析モデル

2.2 解析結果

高周波加熱電力一定の場合、加熱コイル内径の拡大に伴い流下ノズルの発熱量は、直線的に減少する(図-2)。

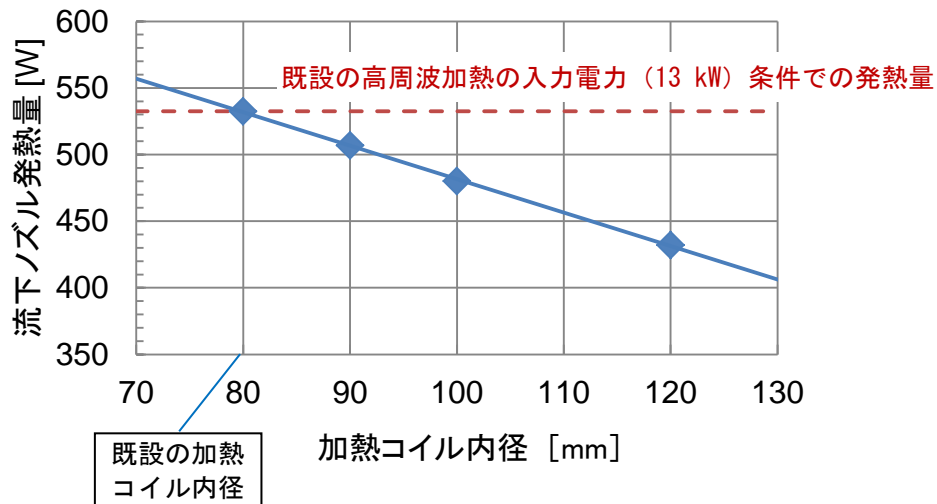


図-2 加熱コイル内径と流下ノズル発熱量の関係
(高周波加熱の入力電力を一定とした場合)

加熱コイル内径を既設の $\phi 80$ mm から $\phi 90$ mm に拡大した場合、高周波加熱の入力電流を約 240 A から約 245 A に増加(電力は 13 kW から約 15 kW に約 15%増加)させることで既設と同等の発熱量が得られ(図-3)、その時の発熱密度分布も既設と同等の分布であることを確認した(図-4)。

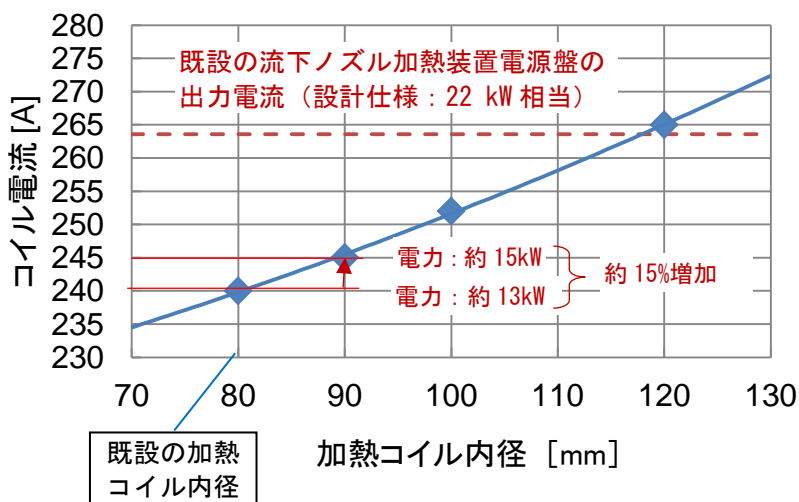


図-3 既設の加熱コイル(内径 $\phi 80$ mm)と同等の発熱量を得るために必要となる高周波加熱の入力電流

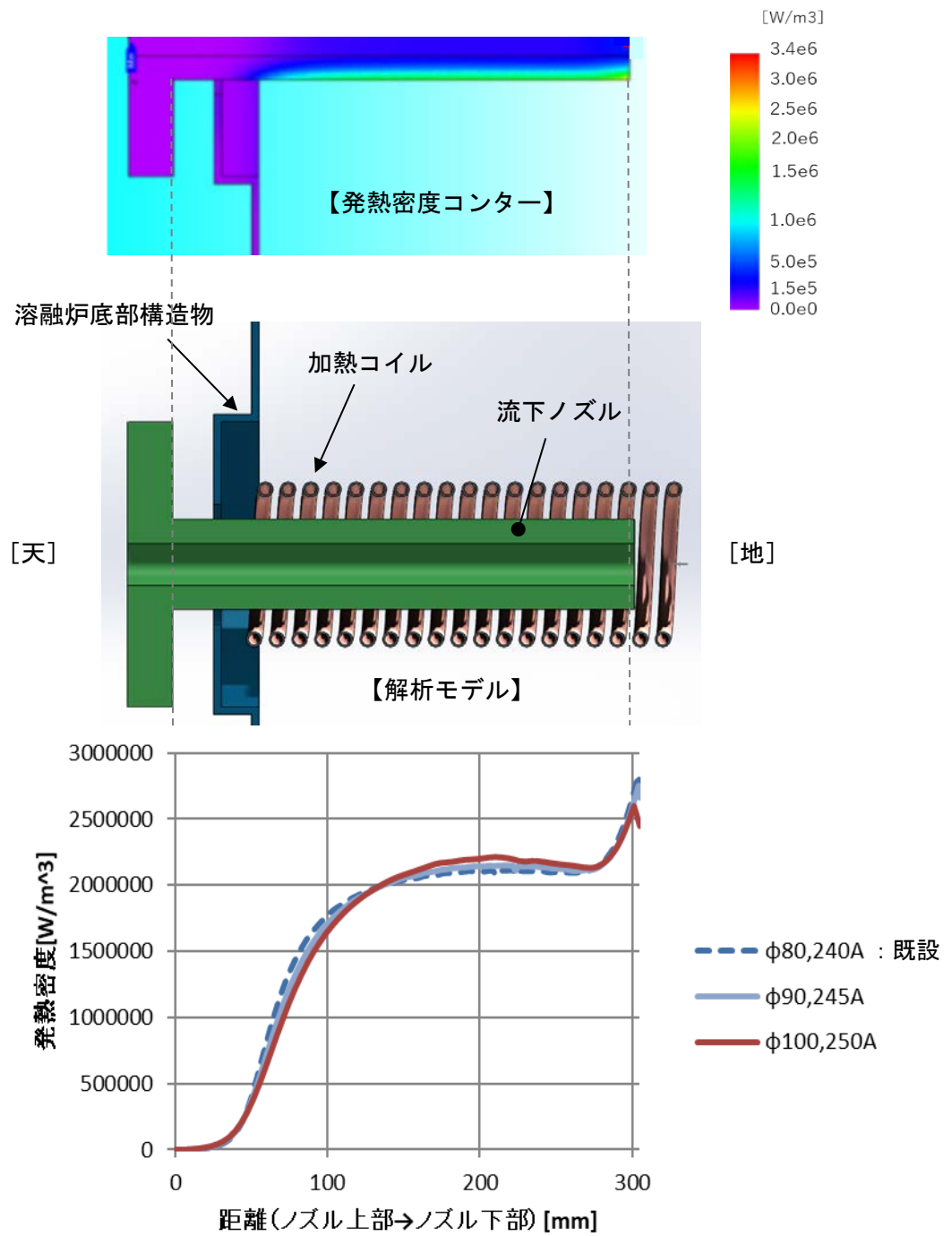


図-4 内径φ80 mm(既設)とφ90 mm及びφ100 mmの加熱コイルで加熱した場合の流下ノズルの発熱密度分布

3. 試験について

モックアップ試験により、既設と同じ内径 $\phi 80$ mm の加熱コイルで加熱した場合の温度分布と比較する方法で加熱コイル内径の拡大、流下ノズルの位置ズレ、絶縁材の有無による流下ノズルの温度分布への影響を確認した。

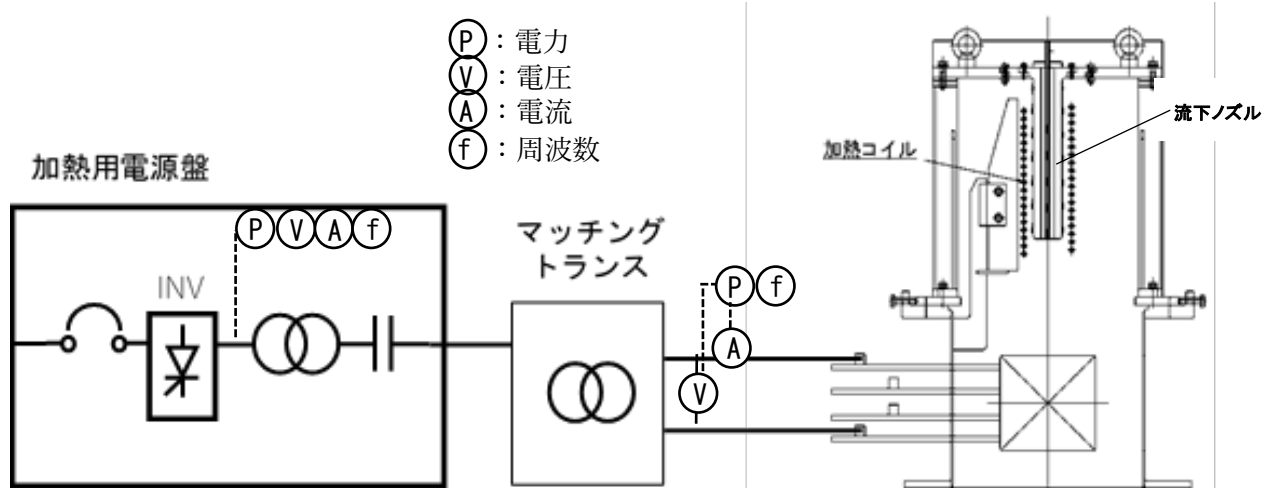
解析では、内径を $\phi 100$ mm に拡大した加熱コイルでも既設と同等の発熱密度分布が得られることを確認しているが、試験は、既設の結合装置に取付け可能な最大の内径 $\phi 90$ mm の加熱コイルで実施した。

また、絶縁材の取付けについては、原因調査で確認した流下ノズル傾きの進展傾向が増大し、流下ノズルと加熱コイルの接触による漏電を防止する対策として検討している。本試験結果に加え、耐久性や流下への影響等の観点から評価し、加熱コイルを結合装置へ組付ける前（令和 3 年 2 月）までに採否を判断する。

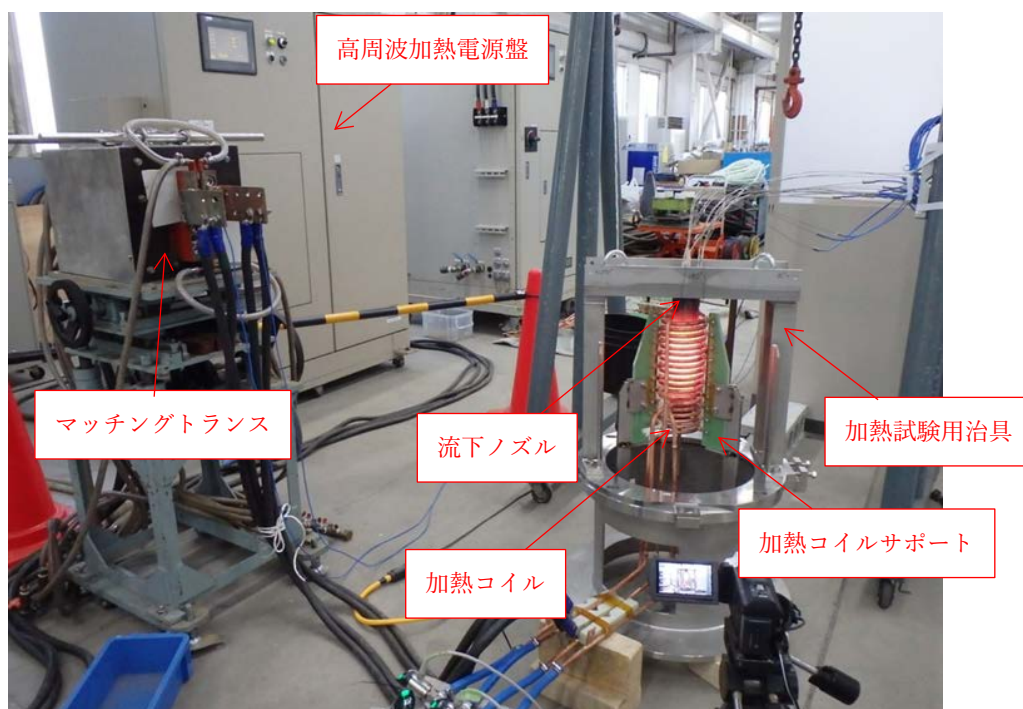
3.1 試験装置の概要

試験装置の概要を図-5、試験装置の仕様を表-2 に示す。

試験は、令和元年 11 月から加熱コイル、試験治具、熱電対等の準備を開始し、令和 2 年 3 月 2 日据付調整を行い、令和 2 年 3 月 3 日～6 日にメーカ工場で実施した。



(1) 試験装置の系統図



(2) 試験装置の外観

図-5 試験装置の概要

表-2 試験装置等の仕様

| 項目 | | 条件 | 既設の仕様等 | 試験への影響等 |
|---------------|--------------|--|--|---|
| 加熱コイル | 寸法 | 内径: $\phi 80$ mm、 $\phi 90$ mm 長さ: 285 mm | ・ 内径: 既設は $\phi 80$ mm。 ・ 長さ: 既設と同じ。 | — |
| | ターン数 | 19 | ・ 既設と同じ。 | — |
| | 材質 | C1220(りん脱酸銅) | ・ 既設と同じ。 | — |
| | メッキ | 無し | ・ 既設は金メッキ。 | 金メッキが無い方がふく射率(吸収率)が高く、流下ノズルの温度が低くなること が分かっており、安全側の 試験となる。 |
| | 冷却 | 冷却水による強制冷却 | ・ 既設と同じ。 | — |
| 加熱コイル サポート | 板厚 | 10 mm | ・ 既設と同じ。 | — |
| | 材質 | FRP | ・ 既設はアルミナセラミック。 | 絶縁材であり、高周波加熱 により発熱しないため、影 響なし。 |
| | 構造 | 周方向 3 箇所 | ・ 既設と同じ。 | — |
| 流下ノズル | 寸法 | 外径: $\phi 60$ mm 内径: $\phi 28$ mm 長さ: 325 mm | ・ 既設と同じ。 | — |
| | 材質 | MA690 (NCF690 と同 等) | ・ 既設は NCF690。 | — |
| 高周波加 熱電源 | 周波数 | 2.0~3.0 kHz の範囲で 調整。 | ・ 既設は約 2.8 kHz。 (設計仕様: 2.0~ 3.0 kHz) | 設計仕様内(2.0~3.0 kHz) であり影響なし。 |
| | 周波数の調整 方法 | マッチングトランス | ・ 既設はマッチング トランス+コンデン サ。 | 設計仕様内(2.0~3.0 kHz) に調整可能であり、影響な し。 |
| | 接続 方法 | ケーブル(約 2 m) | ・ 既設はブスバー (約 15 m)。 | インピーダンスが低い ため入力電力が小さくなるが、 温度分布には影響なし。 |

3.2 試験ケース

試験ケースを表-3に示す。

表-3 試験ケース

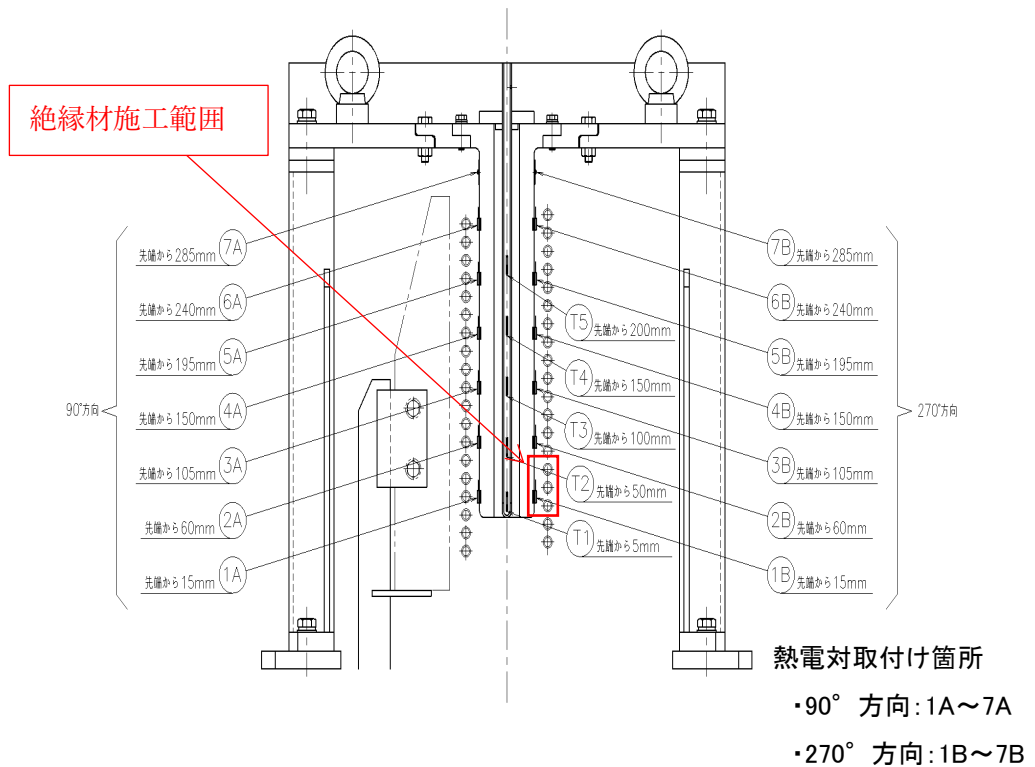
| 試験 ケース | 加熱コイル 内径 | 流下ノズルの 傾き・位置ズレ | 絶縁材 | 目 的 |
|-----------|-------------|-------------------|-----|---------------------------------|
| ① | φ80 mm | 無し | 無し | リファレンスケース |
| ② | φ90 mm | 有り ・ 傾き 1.2 ° | 無し | 加熱コイル内径拡大、流下ノズル傾き等の 影響を確認する。 |
| ③ | φ90 mm | ・ 位置ズレ 5 mm | 有り | 絶縁材の有無による影響を確認する。 |

3.3 温度分布の確認方法

流下ノズル表面に熱電対を取付け(14箇所)、温度分布を確認した。

熱電対の取付け箇所は、加熱コイルと流下ノズルのクリアランスが最も広い方向(90°方向)と最も狭い方向(270°方向)にそれぞれ7本の熱電対を等間隔に設置した(図-6)。

また、絶縁材は、加熱コイルと流下ノズルのクリアランスが最も狭い方向(270°方向)の流下ノズル先端部付近に取付けた(図-6)。



(1) 熱電対及び絶縁材取付け箇所



加熱コイル下端からの写真



加熱コイル横からの写真

(2) 絶縁材取付け状況

図-6 熱電対及び絶縁材取付け状況

3.4 試験結果

高周波加熱時、流下ノズル温度は 1100 °C以下としていることから、最も高い部分の温度が約 1000 °Cになるように加熱し、約 1000°C到達後 30 分時点(温度上昇が 1 °C/min 以下)での各温度計の指示値及び高周波加熱の入力電流、電力、周波数を記録した。

試験結果は以下のとおり。

- ・ 加熱コイル内径を $\phi 80$ mm から $\phi 90$ mm に拡大し、流下ノズルの位置ズレ及び絶縁材を取付けた場合においても同等の流下ノズルの温度分布が得られることを確認した。

なお、この時の高周波加熱の入力電力は、解析結果と同様に約 15 %増加することを確認した。



図-7 流下ノズルの加熱状況

(1) 加熱コイル内径を $\phi 80$ mm から $\phi 90$ mm に拡大した場合、流下ノズルの位置ズレや絶縁材の有無した場合の比較評価のリファレンスとなる試験ケース①における流下ノズルの温度分布を図-8 に示す。

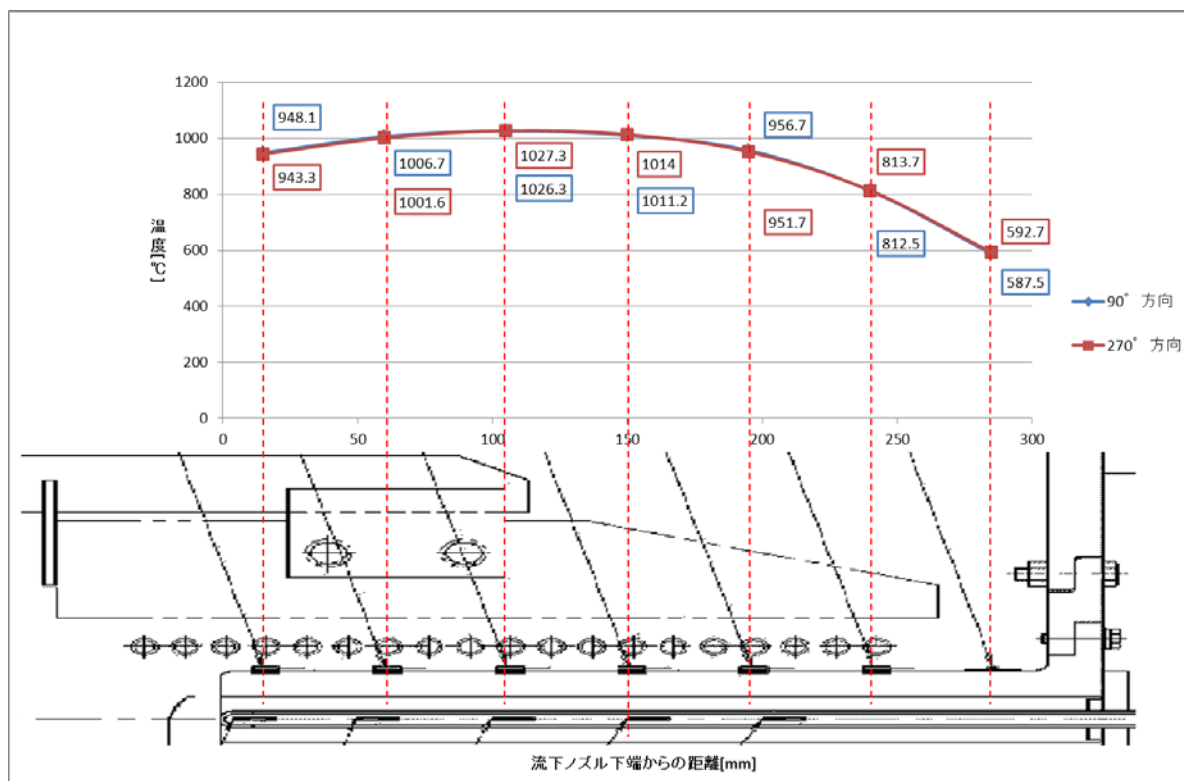


図-8 試験ケース①(リファレンスケース)の流下ノズル温度分布

(2) 試験ケース②(加熱コイル内径拡大+流下ノズル傾き等あり)及び試験ケース③(加熱コイル内径拡大+流下ノズル傾き等あり+絶縁材あり)の温度分布を試験ケース①(リファレンス)と比較した結果を図-9(90° 方向)、図-10(270° 方向)に示す。なお、試験ケース②、③の最高温度について、試験ケース①に比べ約 20 °C程度低くなっているのは、試験の都合上、加熱の調整範囲を約 20 °C程度(0.5 kW)としたことによるものである。

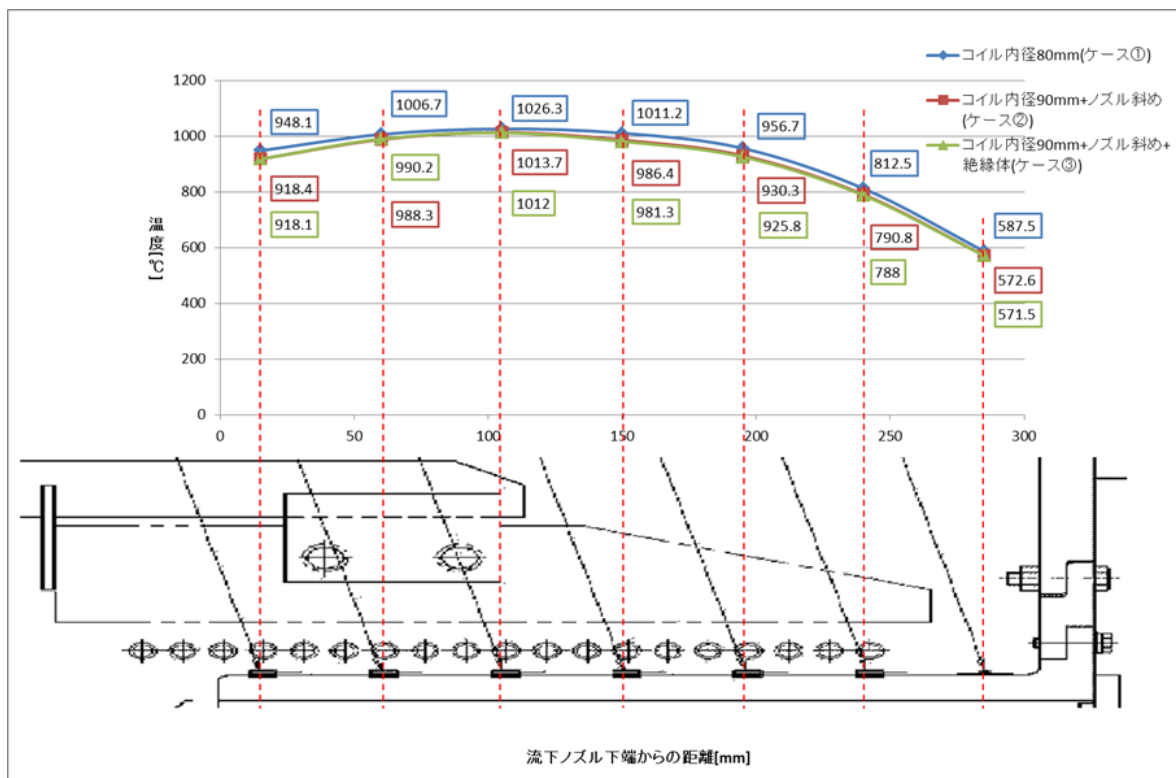


図-9 温度分布の比較結果(90° 方向)

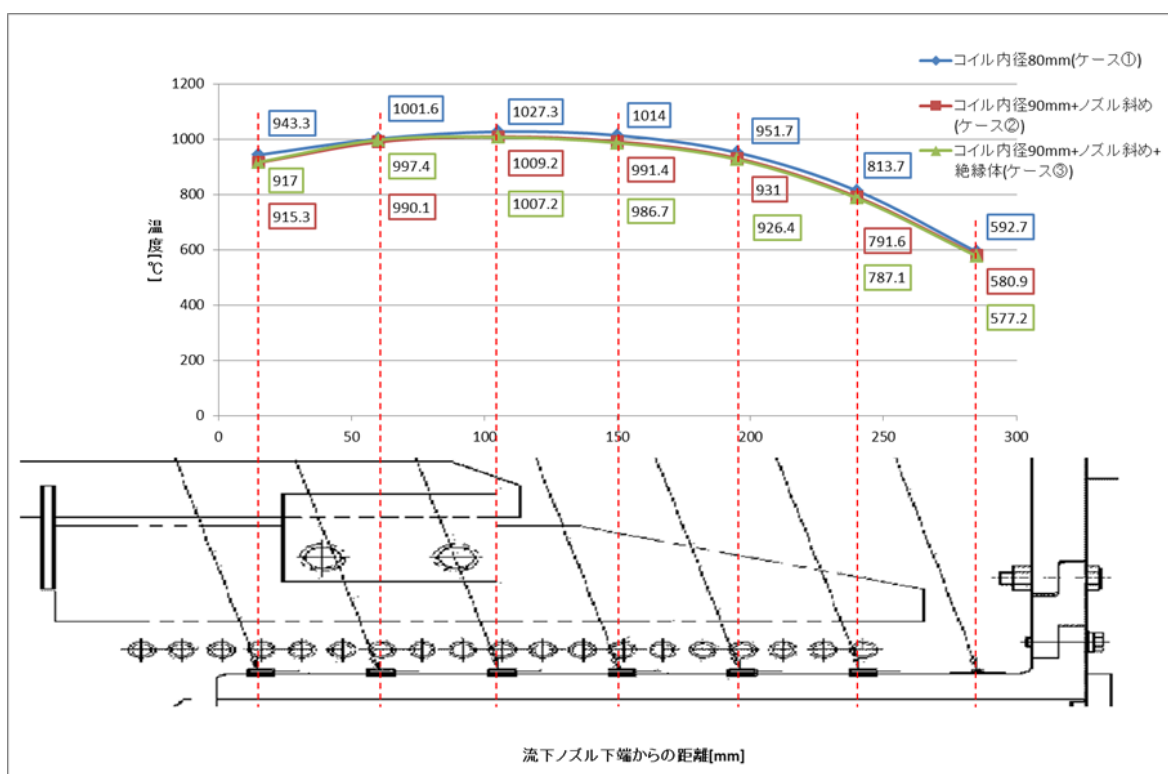


図-10 温度分布の比較結果(270° 方向)

(3) 試験における高周波加熱の入力電力等のデータを表-4 に示す。

表-4 高周波加熱の入力電力等のデータ

| 試験ケース | 電力 | 電流 |
|--------|--------------------------------|---------|
| ① | 約 6.5 kW | 約 450 A |
| 既設(参考) | 約 13 kW | 約 240 A |
| ②、③ | 約 7.5 kW (試験ケース①に対して 15%増加) | 約 485 A |

3.5 評価

(1) 流下ノズルの最高温度の相違

試験ケース①に対して試験ケース②③の流下ノズルの最高温度が 20 °C程度低い値となっているのは、試験装置の仕様(電力調整単位:0.5 kW)によるものである。なお、既設の流下ノズル加熱装置電力盤の電力調整単位は、0.1 kW であり、詳細な調整が可能である。

(2) 高周波加熱の入力電力(電流)の相違

既設に対して試験での電力が半分程度の値となっているのは、試験装置(給電系統)のインピーダンスが既設の 1/10 程度となっているためである。

【給電系統の相違】

既 設 : ブスバー(約 15 m) + 貫通プラグ

試 験 :: ケーブル(約 2 m)

(3) 高周波加熱の入力電力の増加割合

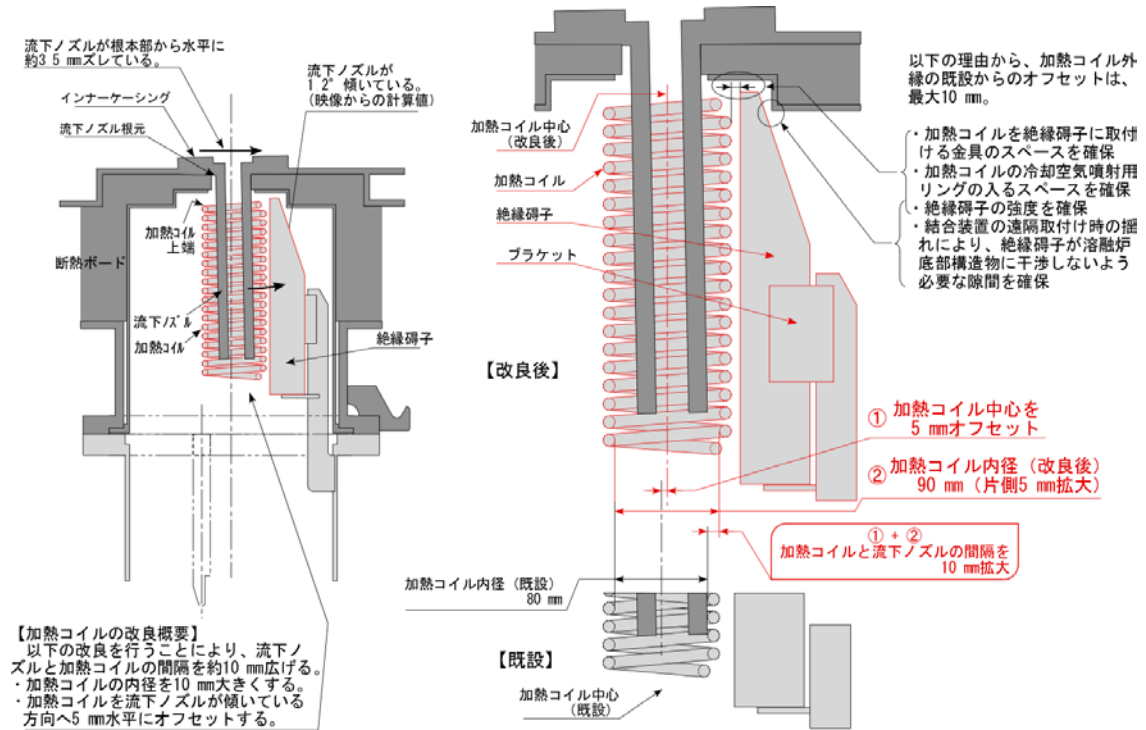
試験ケース①に対して試験ケース②③の高周波加熱の入力電力が約 15 %増加することを確認した。この試験結果は、解析結果と同等であり、解析結果は妥当と評価した。

4. まとめ

解析及び試験の結果から、加熱コイル内径を $\phi 80$ mm から $\phi 90$ mm に拡大しても高周波加熱の入力電力を約 15 %増加させることにより、既設と同等の流下ノズルの温度分布が得られ、流下ノズルの位置ズレや絶縁材取付けの影響を受けないことを確認した。

また、この入力電力の約 15 %増加(既設の約 13 kW に対して、加熱コイルの内径拡大後は約 15 kW を要すると推定)に対しては、現状の設備(22 kW)に十分な余裕があり、改造等せずに対応可能である。

以上から計画している対策実施後においても、既設と同様に流下可能と判断した。



加熱コイル径拡大のイメージ図

【流下ノズルと加熱コイルの観察結果】

【推定方法】

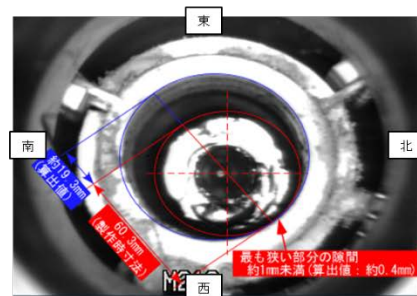
- 流下ノズル外径60.3 mm(製作時の実測寸法)を基準として、画像上での計測値を換算して寸法を算出した。
- 加熱コイルの内径は設計値80 mmとした。

① 流下ノズル先端部

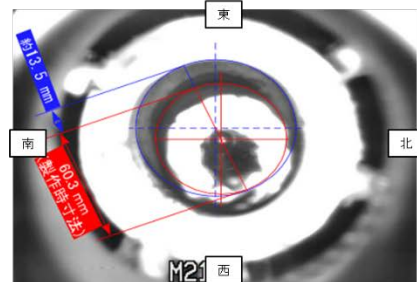
- 流下ノズル先端部と加熱コイルの間隔は、最も広い箇所で約19.3 mm。
- 流下ノズル先端部と加熱コイルの間隔は、最も狭い箇所で約0.4 mmと推定。

② 流下ノズル根本部

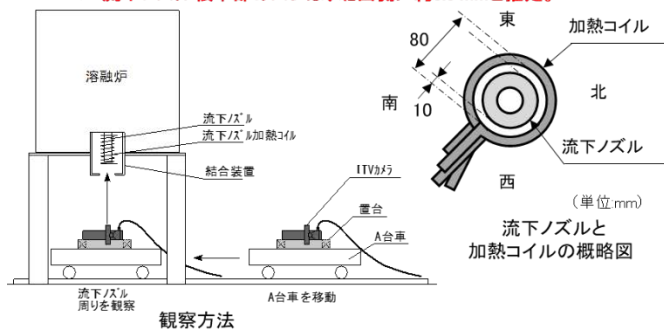
- 流下ノズルの根本付近と加熱コイル上部の間隔は、最も広い箇所ですら約13.5 mm。
- 流下ノズル根本部のズレは、北西側に約3.5 mmと推定。



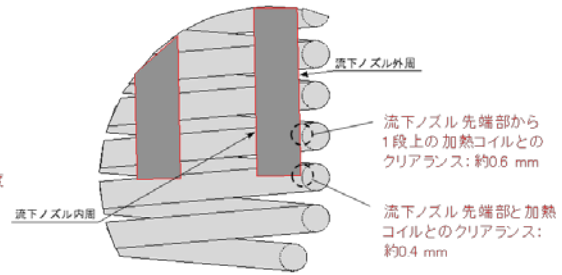
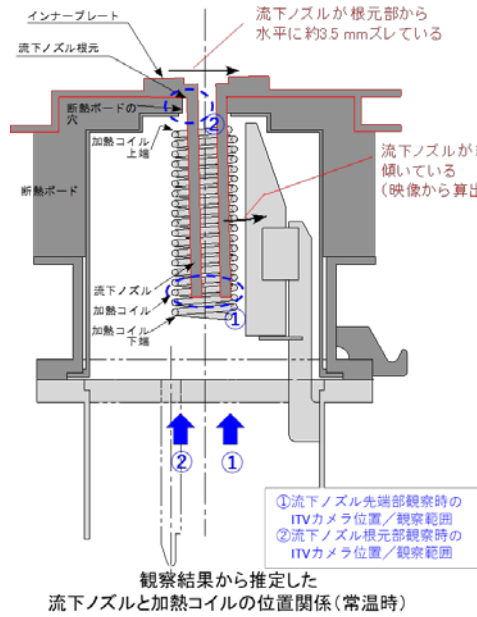
① 流下ノズル先端部の観察結果



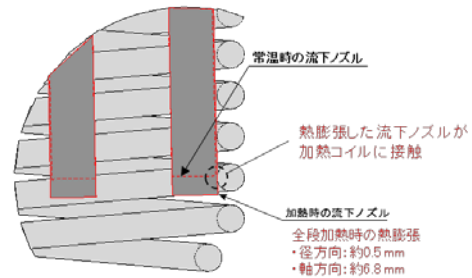
② 流下ノズル根本部の観察結果



✓ 現状、室温の状態では流下ノズル先端部と加熱コイルのクリアランスは最も狭い箇所で約0.4 mmと推定でき、全段加熱時の流下ノズルの熱膨張(軸方向に約6.8 mm、径方向に約0.5 mm膨張する)により、加熱コイルに接触したと考えられる。



流下ノズルと加熱コイルの位置関係拡大図(常温時)



流下ノズルと加熱コイルの位置関係拡大図(全段加熱時)