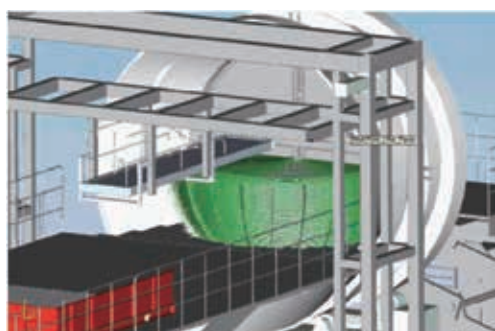
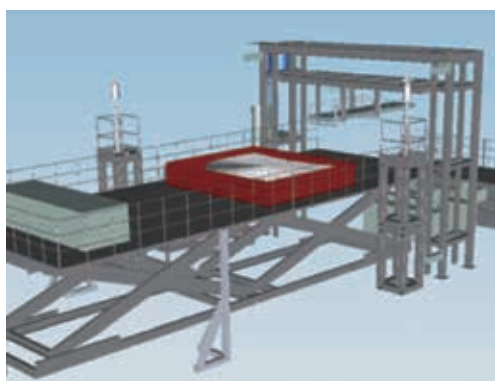


# 電力エネルギーの基盤を担う 至高の熱交換器

## 徹底した自動化により蒸気発生器の 高品質・短納期を実現

原子炉圧力容器の製造で世界トップクラスの納入実績を誇る IHI が、新たに加圧水型原子力発電所の主要機器「蒸気発生器 ( SG : Steam Generator )」の製造にチャレンジしている。最高の信頼性が求められる SG への取り組みについて紹介する。

株式会社 IHI 原子力セクター



蒸気発生器 管束組立



蒸気発生器

### 拡大する世界のエネルギー需要

世界のエネルギー需要は増加を続け、エネルギー源は多様化してきている。例えば、シェールガスやシェールオイルなどの非在来型化石燃料の実用化、再生可能エネルギーの利用促進など、我々の生活のなか

でエネルギーの話題には事欠かない。一方、東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故以降、世界各国で原子力エネルギーの活用に関してさまざまな議論がされてきているが、エネルギー安全保障の観点から、原子力発電は安定したエネルギー供給のために依然として重要な選択肢である。また、地球温暖化対策

である低炭素社会の実現への施策としても、原子力発電は重要な選択肢である。今後、再生可能エネルギーと原子力の双方が持続可能な社会を実現するために重要なエネルギー供給源となるであろう。

世界の原子力発電所の主要炉型は沸騰水型軽水炉（BWR：Boiling Water Reactor）と加圧水型軽水炉（PWR：Pressurized Water Reactor）である。これまで IHI は主に国内向け BWR の原子炉圧力容器を 40 年以上にわたって製造してきた実績がある。一方で世界に目を向けると、今後新規に建設が計画されている原子力発電所の多くは PWR であり、IHI の事業領域を世界市場へ拡大することを念頭に、原子力セクターでは、PWR の主要機器である SG の製造技術開発を進めてきた。

### 過酷な条件で働く巨大で精緻な装置

PWR・BWR どちらも原子力エネルギーで発生した熱を利用して得られた水蒸気によってタービンを回して発電する。PWR の場合は一次冷却水をいったん 300℃ 以上の高温・高圧水として炉心から取り出し、SG で二次冷却水に熱を伝えて蒸気を作る。BWR の場合は炉心で直接蒸気を発生してタービンに導く。つまり SG が PWR を特徴づけるキーハードであり、製造には高度な生産技術を要する。

通常、1 プラントに対して 2～4 基の SG が設置さ

れる。SG は直径約 5 m、高さ約 20 m という巨大な熱交換器と言える。SG 内には原子炉で加熱された一次冷却水が中を流れる伝熱管と呼ばれる直径 10 数 mm の細管が多数配置され、大型の SG では 1 万本以上設置されるものもある。この構造の精緻さは 100 分の 1 ほどに縮小して想像すると理解しやすいかもしれない。SG 全体の形は 500 ml のペットボトルを立てた形に似ている。この中に髪の毛ほどの太さの細管を U 字形に曲げたものを 1 万本以上設置する。つまり円筒断面内には 2 万本以上の管が精確な間隔でぎっしり詰められた形となる。各管の設置位置は、熱交換効率に影響を及ぼすだけでなく、流体の流れによる振動を防止する目的から、三次元的に緻密な精度を要求される。このため、その組み立てにおいては、厳格な精度管理が要求される。まさに完成した構造物が芸術品と呼ばれるゆえんである。

細管の肉厚は薄いほうが熱抵抗が小さく伝熱上有利であるが、伝熱管は一次系と二次系を隔離する障壁（バウンダリー）としての役割ももっているため、プラントの運転などを考慮して注意深く設計を行い、必要な肉厚が決められている。また、伝熱管に万一破損などが生じると、一次系で生じる放射性物質が二次系を汚染するなどの重大事故につながる恐れがあるため、伝熱管の設計に注意を払うとともに、SG の製造途中では伝熱管を非常にデリケートに取り扱う。



管板 BTA ( Boring and Trepanning Association ) 深孔加工機

## 量産レベルの高品質・低コストを実現

一般的に原子力発電所はサイトごとに詳細仕様が異なるのが実情であるので、使用される主要機器の基本設計は存在するものの、実際にはインデント製品の性格をもつ。そのため、高い安全性と信頼性を実現するために、各製造工程でさまざまな検査が行われるが、時としてそれがほかの量産機器に比べて長い製造期間が必要となる宿命があった。そこで、SG 製造に取り組むに当たり三つのコンセプトを掲げた。

- (1) 人為的ミスを極力排除（自動化の推進）
- (2) 迅速な検査・計測と製造プロセスのリアルタイム把握およびデータの活用（トレーサビリティの確保）
- (3) 工程の標準化の徹底

(1) は加工や溶接などの作業の自動化によりヒューマンエラーを極限まで低減する。均一な品質を確保するためにも自動化は有効な手段である。(2) は作業と計測のタイムラグを削減し、リアルタイムで計測結果を把握して製造プロセスにフィードバックする。(3) はインデント製品であっても共通する作業を標準化し、作業者が担当する業務範囲を狭める工程設計や生産方式を採用することによって、技術の熟練と確実な工程管理を実現する。

これに加えて製造上の大きな課題が四つあった。① 管板孔あけ（深孔加工）、② 支持板孔あけ（ブローチ加工）、③ 伝熱管溶接、④ 伝熱管組立、であり、どれも難関であった。これらを解決するために新たな製造設備や作業手順を開発する必要があった。こういった製造技術の基礎には BWR 型原子炉圧力容

器の製造技術とともに多管式熱交換器やリアクター（反応器）の製造技術、ジェットエンジン製造における加工技術、さらには検査・計測・溶接などの基盤技術があったことを忘れてはならない。

## 自動化によりヒューマンエラーを排除

大型の PWR 用 SG の管板には 1 万本以上の伝熱管を貫通させ、端部を溶接する。伝熱管をサポートする管支持板にあける孔は特殊な形状に加工する必要がある。

一次系と二次系のもう一つのバウンダリーとなる管板の厚さは約 800 mm、これに 1 万本以上の伝熱管が通る貫通孔をまるで蜂の巣のようにあける必要がある。伝熱管は SG の中で U 字に曲がり、二次冷却水に熱を伝えて冷やした一次冷却水は再び炉心に戻る。このため、実際には管板に合計 2 万個以上の貫通孔が必要になる。寸法はもちろん、位置や角度についても一つ残らず設計精度内に収めることができなければ伝熱管を取り付けることはできない。

また、管支持板には三つ葉型や四つ葉型の孔をあける必要がある。二次冷却水や気泡は三つ葉型や四つ葉型の孔と伝熱管との間にできる葉の部分の間隙を通過して SG 内を通過する。これらの加工を精度良く行うために今回、加工機メーカーや工具メーカーと協力して、深孔加工やブローチ加工の専用加工機、工具を開発した。

さらに、管支持板の孔が滑らかでないと、伝熱管を挿入する際に伝熱管を傷つけてしまい、破損の原因になる。そのため、管支持板は加工後に表面を滑らかに



自動化技術



研磨される。いわゆる「バリ取り」である。バリ取りを手で行う場合には、押付圧力が一定ではなかったり、研磨時間にばらつきが出たりする可能性がある。そのため、この工程でも自動化が行われた。そのほか、管板と伝熱管の2万か所以上の溶接やヘリウム漏えい試験にも自動化装置が開発され、安定した品質のものづくりが実現した。

## 最新の計測技術と作業の標準化

すべての伝熱管は複数枚の管支持板を貫通して保持されている。挿入時に伝熱管を傷つけて稼働中のトラブルの原因とならないように、2万を超えるすべての管貫通孔を高い精度で一直線に並べる必要がある。そのため、管支持板をSG本体に取り付ける際には、3Dレーザー計測による取り付け位置の確認と、新たに開発した専用の取り付け装置を使用することによって、要求精度での取り付け作業を実現している。これらは、高精度の計測技術とリアルタイムの制御技術の統合によって可能になった。

また、インデント製品の特徴として製造工程の標準化が難しい点が挙げられるが、この点の解決にも積極的に取り組んだ。例えば、伝熱管を挿入する作業では、作業者の作業姿勢や作業内容を分析し、作業者と製品にやさしい標準作業プロセスを構築した。組立過程の妥当性を最終確認する段階では、工場作業の経験がない一般の人に実際に挿入作業を経験してもらい、問題なく挿入できることを確認した。現在はそこで得られた情報を基に作業の自動化を進めさらに安定した挿入作業を実現している。これによって、品質を保ちながら製造期間の短縮化を実現できた。

SGの製造に当たっては、標準化や自動化だけではなく、IHIならではの熟練した職人の技も不可欠であった。その好例が、伝熱管の振れ止め金具（AVB：Anti-Vibration Bar）の溶接である。AVBは伝熱管のU字管部分をすり抜けて上昇する二次冷却水が、細管を揺らして発生する伝熱管の振動を抑えるための部材であり、長時間の振動に起因する伝熱管の疲労・摩耗を防いで、原子力発電所の安定した運転を維持するための極めて重要な役割を担っている。微妙な感覚と長年の経験が要求される難しい溶接は、熟練した作業者にしかできなかった。



3Dレーザー計測

## おわりに

ここで紹介したさまざまな取り組みの成果は、フルスケールモックアップ（実物大の試作品）の製造によって実証されている。SGの信頼性向上は、原子力発電所の安全性向上を実現するだけでなく、安定したベースロード電源として電力会社や電力ユーザーの期待にも応えていくものである。

IHIのSGはPWRプラントの供給メーカーであるウエスチングハウス社（アメリカ）にも認められ、また、SG製造専用の新工場も完成し、新たなSG製造者としての第一歩を踏み出す準備が整った。我々は原子力エネルギーによって「世界を豊かに」、「人々を幸せに」をモットーに、より安全で、より安心していただける「ものづくり」を今後も進めていく所存である。

問い合わせ先

株式会社 IHI

原子力セクター

電話（045）759-2503

URL：www.ihico.jp/