原子力発電所向けポンプの信頼性向上/運用高度化の取組み

Technologies of Pumps for Nuclear Power Plants to
Improve their Reliability and Operability

可動翼 循環水ポンプ

高圧多段ポンプ

日高 達哉*1 Tatsuya Hidaka
高永 恭平*1 Kyohei Takanaga
中澤 彰吾*1 Syogo Nakazawa
片岡 嘉彦*2 Yoshihiko Kataoka
佐久間 啓臣*3 Hiroomi Sakuma
岩佐 佳成*4 Yoshinari Iwasa

原子力発電所では，多種多様のポンプが発電サイクルにおける熱輸送の手段や，安全系機器として冷却水の注水手段として使用されている。当社は，国内 PWR（加圧水型軽水炉：Pressurized Water Reactor）原子力発電所向けに，プラント建設初期から最新プラントに至るまでの技術知見を結集した設計・製造技術で，各種の大容量ポンプ・高圧ポンプを納入してきている。本報では，近年の発電出力の増加や経済性の向上，原子力発電所における更なる安全性・信頼性の向上に向けた，循環水ポンプや高圧多段ポンプに採用している最新技術や，新規開発されたメンテナンス治工具を紹介する。

1. はじめに

国内 PWR 原子力発電所で使用する各種の大容量ポンプ・高圧ポンプには，原子炉系の1次冷却材ポンプ，安全機能を有する充てんポンプ，高圧注入ポンプ，余熱除去ポンプ，蒸気タービン系を構成する主給水ポンプ，復水ポンプ，循環水ポンプ等がある。この内，循環水ポンプは，復水器に海水を送水するためのポンプであり，原子力発電所内では最大容量のポンプである。循環水ポンプは，発電出力の増加，及びポンプ台数削減による省スペース化，系統構成の簡素化を目的に，大容量化が進んでおり，当社は世界最大クラスの循環水ポンプを納入している。また，循環水ポンプの羽根車に可動翼機構を採用することによって，ポンプ駆動に要する消費電力の削減も果たしている。また，原子炉系への1次冷却材の充てん機能を担う充てんポンプや，原子炉冷却材喪失事故時に炉心冷却機能を担う高圧注入ポンプなどの高圧多段ポンプは，高い圧力での注水を行うポンプであり，当社は高い信頼性を有する高圧多段ポンプを納入している。

本報では，循環水ポンプに使用する大容量可動翼機構の構造，可動翼機構による経済性向上，大容量化を実現する設計・製造技術を，また，高圧多段ポンプの信頼性向上を図る最新設計や作業性向上へのメンテナンス治工具の改良を説明する。

2. 大容量可動翼循環水ポンプ

2.1 可動翼機構の構造と構成

図1に大容量可動翼循環水ポンプの外観と構造を示す。当該ポンプは，立軸斜流ポンプの基本構造を有しており，海水取水槽に羽根車部を没水させて駆動することにより，大きいものでは15 万 m^3/hr 以上の流量の海水を取水する。可動翼機構については図2に示す。翼開度は，油圧によって主軸内の調整棒を軸方向に可動させ，調整棒と連結されているクロスヘッドの軸方向の動作が，ボールジョイント，アームを介して，ランナーベーン（翼）の回転動作へと変わることで操作

*1 原子力セグメントプラント設計部 *2 原子力セグメントプラント設計部 次長
*3 原子力セグメント 主幹プロジェクト統括 技術士（機械，原子力・放射線部門）
*4 原子力セグメントプラント設計部 部長

される。翼の開度は全開から全閉まで連続的に調整することが可能であり，ポンプ運転中でも開度を変更することが可能である。

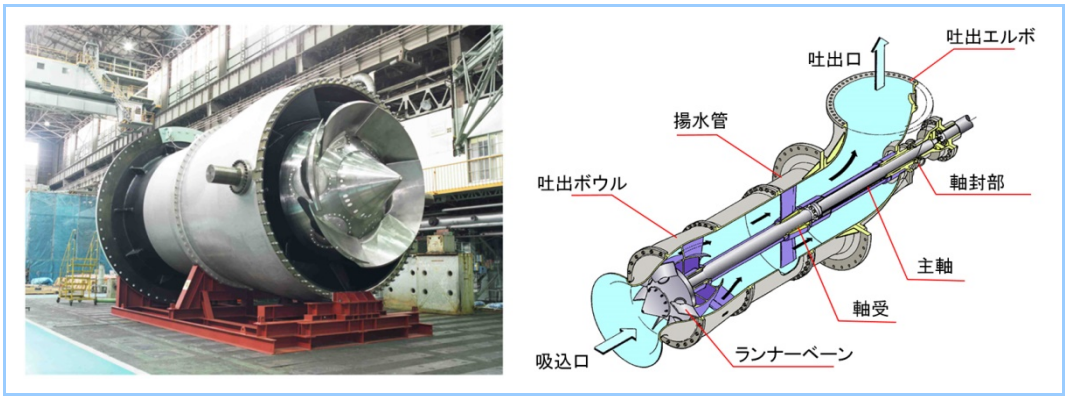

図1　大容量可動翼循環水ポンプの外観と構造

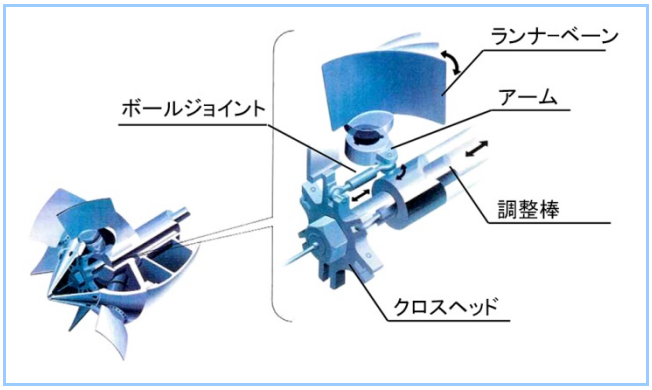

図2　可動翼機構

2.2　可動翼循環水ポンプの利点（経済性向上）について

図3に，可動翼循環水ポンプの性能曲線を示す。循環水ポンプは，発電所の運転状況や季節による海水温度の変化により，発電所側が必要とする運転流量が変化する。しかし，翼開度機構を持たないポンプでは，ポンプ流量−効率特性は山型曲線を描き，ある1点の流量で最高効率を有する特性であるため，運転流量が変更された場合には，非効率な運転状態となることを余儀なくされる。これに対して，可動翼ポンプでは，翼の開度を任意に調整することによって，ポンプ最高効率流量を任意に変更することが可能となる。その結果，可動翼循環水ポンプは，発電所の必要流量の変更に対応して常にポンプの最高効率点付近での運転が可能となり，固定翼ポンプと比べて，大幅にポンプ駆動に要する消費電力を低減することができる。

2.3　大容量化を実現するための取組み

当社循環水ポンプは，ポンプ重量が 200 トンを超えるような大容量化が進んでおり，綿密な設計及び製造性の事前評価が重要である。代表的な設計評価としては，強度，疲労，振動評価が挙げられ，FEM（Finite Element Method）解析や，縮小モデルでの模型試験を実施する場合もある。また，各検討結果の評価は，規格・規準の他，多数の製造実績や経験により培われた知見に基づく，社内設計基準を適用し，設計評価の高度化を図っている。

1）強度評価

図4にランナーベーン（ポンプ翼部）に対する FEM 解析の例を示す。ランナーベーンはポンプ性能に関わる重要部品であり，FEM 解析による応力評価により高応力部を把握し，強度面での健全性を確認している。

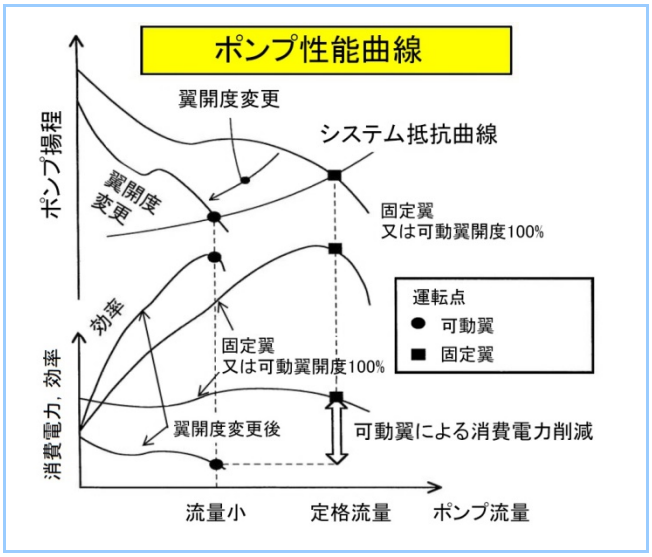

図3　可動翼循環水ポンプの性能カーブ

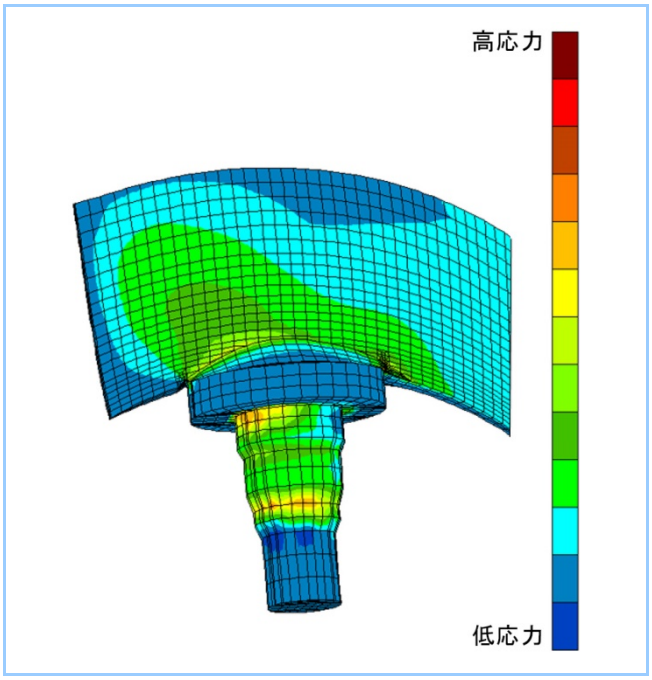

図4　FEM 解析結果(ランナーベーンに生じる応力)

2)疲労評価

ランナーベーンには，流体力による変動荷重が作用するため，疲労破壊の観点で問題がないことを確認する必要がある。このため，上記の FEM 解析による静的な応力評価に加えて，実機相似の模型ポンプを製作し，高応力部等に歪ゲージを貼付して運転中の変動応力を計測することにより，繰り返しの変動応力に対する健全性を確保している。

3)振動評価

循環水ポンプの運転により発生する加振力が，ポンプの軸系又は構造系が有する固有振動数に合致した場合には，重大な振動問題等に繋がる可能性がある。

大容量化によって重量や剛性が大きく変化することから，固有振動数に問題が無いことを設計段階で確認することは重要であり，電動機を含めた回転体全体をモデル化し，自社解析コードによる軸系固有値評価を実施している。また，ケーシングについても構造系固有値評価を実施している。図5に，構造系固有値解析結果の例を示す。

4)製造性の検討

ポンプの大容量化に伴い，当社では製造性を考慮した特別なポンプ構造を採用している。こ

の一例として，図6に口径4m，重量 50 トンを超えるような大型鋳造品である吐出エルボを示す。一般的には1つの曲管部品として製作されるが，この例では鋳造性や加工性を考慮して二分割された曲管としている。吐出エルボは，主軸を支持する軸受部を構成する部品であり，二分割された各部品は高精度に加工・組立されなければ回転体と静止体の軸芯ズレなどが許容できなくなり，回転機械として成立しなくなる。このため，加工手順などの製品外観上には現れない当社独自のノウハウを投じている。

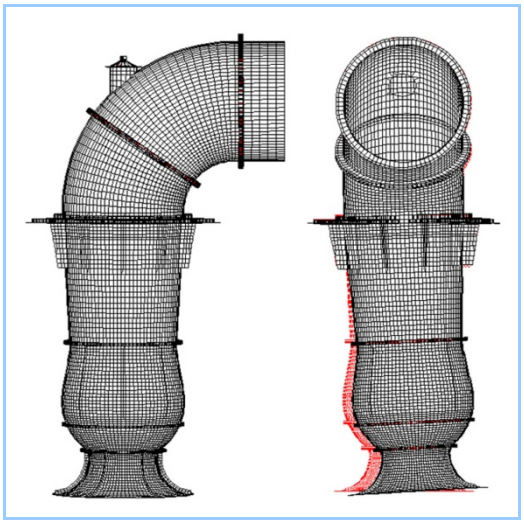

図5 固有値解析結果(構造系)

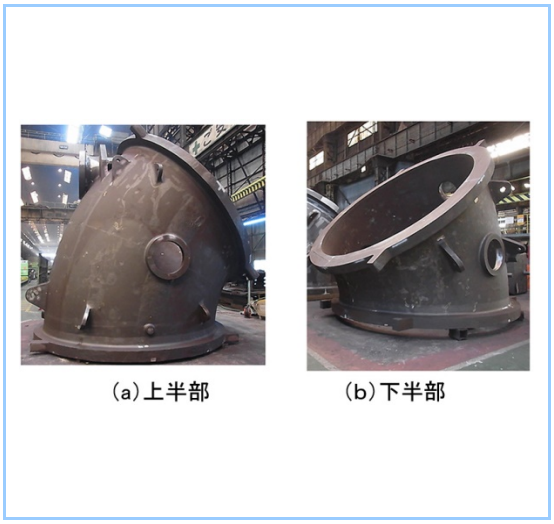

図6 二分割 吐出エルボ

3. PWR 向け高圧多段ポンプ

3.1 高圧多段ポンプの構造

図7に，PWR プラントに採用している高圧多段ポンプの構造を示す。耐圧性能に優れる外部ケーシングと内部ケーシングを設けた二重ケーシング構造とし，高揚程を得るために羽根車段数が 10 段前後となる多段ポンプとしている。このような構造を採用しているポンプとして，1次冷却材の充てん機能を担う充てんポンプや，原子炉冷却材喪失事故時に炉心冷却機能を担う高圧注入ポンプがある。これらは，安全機能を有するポンプとして，高い信頼性が得られるよう最適な流路設計や部品構造を採用している。

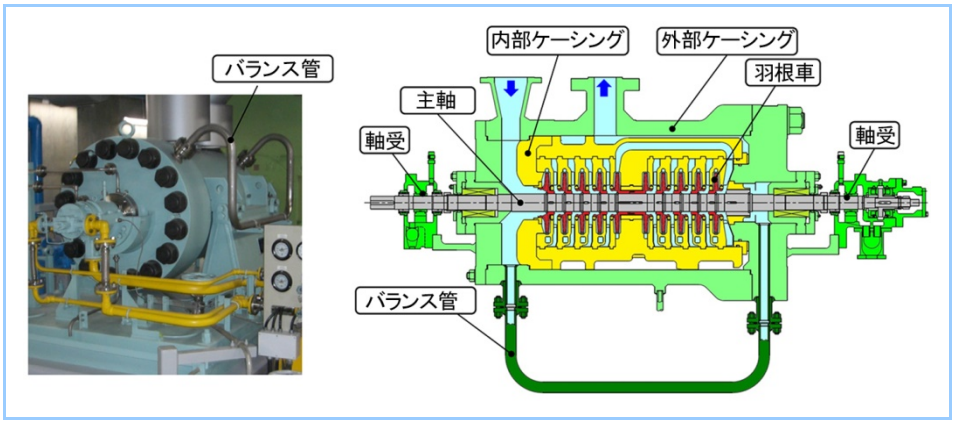

図7 PWR 既設プラント向け高圧多段ポンプ

3.2 更なる信頼性向上のための高圧多段ポンプの設計改善

高圧多段ポンプも，これまでの原子力発電所での運用経験や，火力発電所など他分野での事例・実績も踏まえて継続的な改善を続けている。近年導入を進めている特定重大事故等対処施設向け高圧多段ポンプでは，更なる信頼性向上のためにバランス管や主軸の設計に，当社最新設計を採用している(図8)。

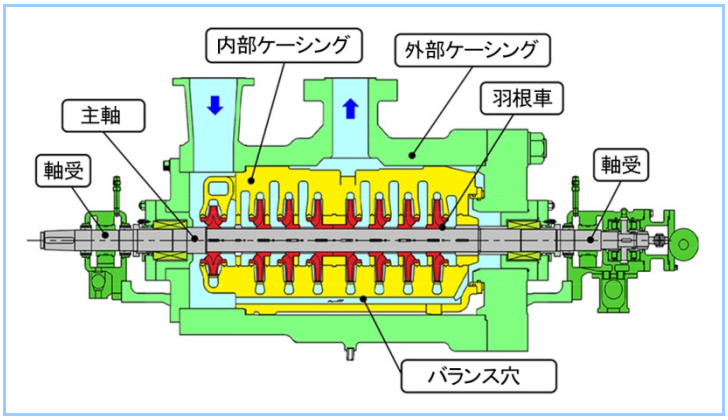

図8 特定重大事故等対処施設向け高圧多段ポンプ

1)バランス管削除

ポンプでは，運転時の羽根車周辺に生じる圧力分布に起因して，主軸には軸方向の推力が発生する。この軸推力は軸受を配置して荷重を支持するが，高圧多段ポンプの場合，軸受が支持可能なレベルまで軸推力を軽減することが必要となる。従来のポンプでは，バランス管をケーシング外部に配置し圧力の不均衡を釣り合わせる機構を採用しているが，最新設計では，ケーシング内部に圧力バランス用の穴を設けた構造とすることでバランス管を不要としている。これにより，耐圧部に関わる部品点数や溶接部・フランジ接続部等が削減され，長期の耐圧性能に対して信頼性を向上している。

2)主軸応力集中部の削減

原子力発電所で使用される高圧多段ポンプは，要求される高揚程に対して，要求流量が小さいという特徴があり，直径の小さい遠心羽根車と軸径の細い主軸を高速で駆動する多段ポンプとなる。このことから，主軸に対して十分な強度を確保することが信頼性向上として求められる。従来の高圧多段ポンプ主軸には，羽根車の固定部として複数の溝部が存在したが，このような部位は運転中の応力集中部となるものであり，最新設計では羽根車の組立構造を見直しすることにより，可能な限り主軸の溝部を削減した構造を採用している。

3.3 メンテナンス治工具による作業性向上

原子力発電所では，定期検査時に計画的な分解点検が実施されているが，特に放射性物質を内包する流体を扱う1次系ポンプにおいては，分解点検作業を簡素化することにより被ばく低減が図られ，発電所のメンテナンス費用低減にも寄与するものとなる。高圧多段ポンプは，分解・組立作業に対して熟達した技量を要する作業があるが，新しいメンテナンス治工具の適用により作業性の向上を図っている。

1)内部ケーシング引き抜き治工具

高圧多段ポンプは，堅牢な構造とするためダブルケーシング構造であり，外部ケーシングは高強度の炭素鋼又は低合金鋼として，内面接液部にはステンレス盛金を施工し耐食性を確保している。分解点検では羽根車・主軸等の回転体を含む内部ケーシングを高精度に水平を維持したまま，外部ケーシングから横方向に引き出しする必要があるが，熟練技術が無くても外部ケーシングのステンレス面に傷を付けずに分解できるよう，内部ケーシング引き抜き治工具(図9)を考案し作業改善を図っている。当該治具は，ガイドレール・軸スリーブとそれらを支持・横移動させるためのローラが主要な構成部品であり，ガイドレール・軸スリーブの位置調整が完了すれば，容易に内部ケーシングの引き抜き作業が行われ，この際のケーシング損傷リスクを大幅に低減できるものである。

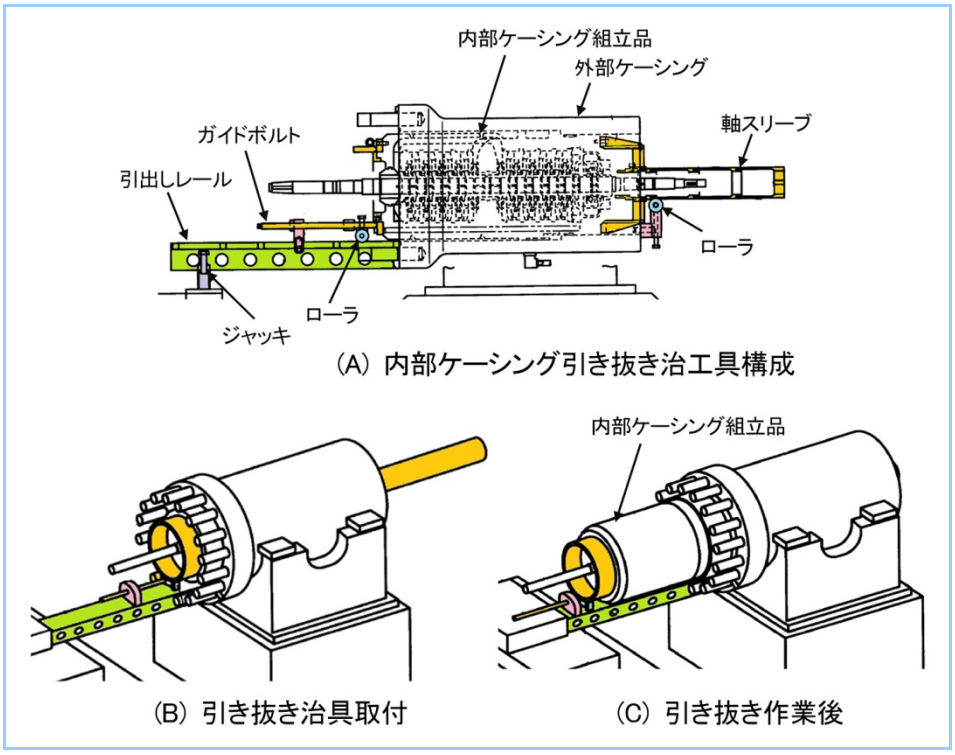

図9 内部ケーシング引き抜き治工具

2) 高周波誘導加熱工法による主軸部品分解治工具

軸継手等は，高速回転中でも組立状態に狂いが生じないように主軸に焼き嵌めされている。従来，これらを分解する際にはガスバーナーを用いて対象部品を全周にわたり均等に加熱して，かじりつきに細心の注意を払いながら主軸から引き抜き分解する必要があった。このバーナー加熱や，部品の取り外し作業は，定量的に作業要領を定めることが困難であり，加熱具合などは経験に基づく技量に頼らざるを得ない部分がある。この作業性の課題に対して，高周波誘導加熱工法による焼嵌部品の引き抜き治工具を実用化している(図 10)。加熱コイルへの電力供給条件や保持時間は，同じ部品であれば定量化が可能であり，作業者の経験値や感覚に寄らず安定した分解作業を実現するものである。本治具は，部品形状にあった加熱コイルがあれば，高圧多段ポンプに限らず様々なポンプ焼き嵌め部品への適用が可能である。

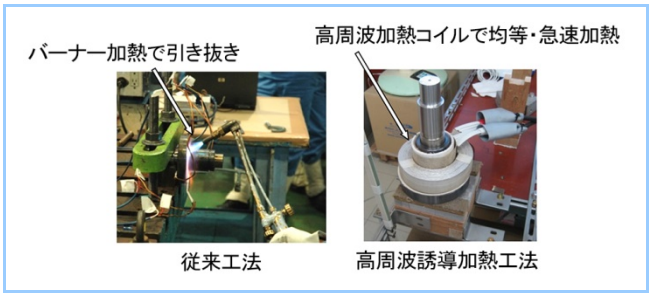

図 10 高周波加熱工法による主軸部品分解治工具

4. まとめ

本報では，原子力発電所向け循環水ポンプや高圧多段ポンプに採用している最新設計や，新規開発したメンテナンス治工具について紹介した。当社循環水ポンプは，国内では，全ての PWR プラントに加え，一部の BWR プラントでも採用され，海外では，中国の三門原子力発電所に，当社主給水ポンプとともに採用されている。今後も，当社ポンプ及びメンテナンス治工具は，新設発電所での採用や，既設発電所での換装として，国内外の原子力発電所の信頼性向上・運用の高度化に寄与していくものである。