

## 学 位 論 文 題 名

## 原子炉系機器の流れによる不適合発生とその恒久対策に関する研究

## 学位論文内容の要旨

2011 年 3 月 11 日、福島第一原子力発電所においては、炉心を冷却するという重要な機能を失うことになり、放射能の閉じ込め機能の喪失という深刻な事態に陥った。この事故についての分析や、原子力安全の確保のために、これからやらなければならない対策は今後の検討にゆだねるが、他の原子力発電所の運転を継続するためには、原子力発電システムとしての安全性・信頼性を向上させるため努力が必要である。1966 年の日本原子力発電東海発電所の稼働以来、約 700 件と多くの不適合を克服してきた。不適合の件数は、年間約 1 件/基を越える不適合発生件数は、40 年を経た現在では、年間約 0.2 件/基程度にまで減少してきている。

なかでも、沸騰水型原子炉 (BWR) の再循環ポンプは、(1) 圧力脈動に起因する溶接部の疲労き裂、(2) 主軸の熱疲労が発生した。更に、改良型沸騰水型原子炉 (ABWR) においては、応力腐食割れが多発した再循環系配管を削除するという抜本的な対策のために、炉内内蔵型の再循環ポンプ (インターナルポンプ) を採用したが、初号機の試運転中に (3) 主軸が振れ回るホワール現象が発生した。

沸騰水型原子炉においては再循環ポンプは炉心の出力制御や燃料の冷却に直接関係しており、このシステムの安全性・信頼性確保は重要である。そこで、本研究では、これらの重要な不適合事象を対象として、以下の 3 つの現象のメカニズムを解明とその評価法の確立、恒久対策を得ることを目的として研究を実施した。

- (1) ポンプの羽根車の回転により発生する圧力脈動の評価法と対応策
- (2) ポンプの回転軸の軸封部間隙での高温低温水の混合による熱疲労の評価と恒久対策
- (3) 縦型ポンプの不安定解析と適正な軸受構造の評価

第 1 章「緒論」では、研究の背景、研究目的、従来の研究の概要と本研究の位置付けと研究方針について述べた。

第 2 章では再循環ポンプの羽根車の回転により発生する、ポンプの脈動による構造励振 (共振現象) の評価法と構造健全性の確保のための方策の考え方を示した。この事象は、ポンプの羽根車の一部を損傷させ、ポンプを停止させるばかりではなく、その破片を炉内に流入させた。このような事象を再び起こさないために、ポンプの羽根車の回転に伴って発生する圧力脈動を回避するため、ポンプの羽根車の周囲に圧力脈動の周波数に一致する構造を置かないこと、また、たとえ共振

しても構造健全性が十分に保てるものとする、などの評価法と恒久対策を得た。

第3章では、ポンプの回転軸の軸封部間隙での高温低温の二温度水の混合による熱疲労の評価と恒久対応策を研究した。ポンプの軸封部の構造のような微小間隙構造部での温度差の大きな二流体の混合では、構造材料表面に温度変動による熱疲労が発生する。そこで、循環する熱水と冷却用のパージ水の混合部近傍に発生する熱疲労の発生予測法を導出し、これを基に恒久策としてケーシングカバー内にサーマルバリア (円筒障壁) を取り付け、このサーマルバリアにパージ水を徐々に加熱して温度差を低減する多数のキリ孔をあけた恒久対策構造を構築し、流動解析と実規模大の試験を実施して効果を確認の上、国内外の実機に適用した。温度差はサーマルバリア出口で約 12℃ の温度差まで低減でき、その後、不適合は報告されていない。

第4章では、縦型ポンプの流体軸受けの不安定性問題である。この縦型ポンプでは、吐出流れが直接高速流で炉内に流れ込むことから、炉内構造の流動振動に対する構造健全性の確保が必要である。本研究では、軸流型の縦型ポンプにおいては、軸流はスラスト力を生むがラジアル力は小さいことを計算流体力学 (CFD) コードを用いた解析により突き止めた。特に、軸受構造の回転軸にクラッド (水垢) が付着すると不安定となり、ホワール振動を発生することを解明し、これを実験により検証した。更にこの抜本的な対策としてハウジングとディフューザとの微小間隙部に複数個のグループを設けることで、安定な流体軸受構造を得た。この改良型のポンプが最新鋭の原子力発電所の再循環ポンプとして使用され、安定な運転が継続している。

第5章では、本研究で得られた成果を総括している。原子炉再循環システムの主要機器である再循環ポンプの健全性を確保することは、このシステムの重要な機能である炉心燃料を冷却する機能を確保するものである。ポンプの圧力脈動によるポンプ内部構造の損傷・破損や、ポンプの主軸の熱疲労や振れ周りによる主軸の損傷は、重大な事故につながりかねないものであり、このシステムの安全が原子力発電所全体の安全に影響することから、事象の再発を防止する恒久対策が極めて重要である。本研究では、理論的な想定から解析を行うことと、実験や検査によるデータを分析することとを合わせて、現象のメカニズムを同定して、実態に合った適切な評価法を導出した。それにより、再び同様の不適合を起こすことのない構造を得ることができた。

更に、類似の不適合事象の発生を防ぐべく、脈動の伝播による疲労損傷の評価、熱疲労の発生評価などを展開し、対策の構築に役立てると共に、改良品の輸出による恒久対策の国際展開や学会標準の策定にも貢献した。

# 学位論文審査の要旨

|    |      |     |     |
|----|------|-----|-----|
| 主査 | 教授   | 奈良林 | 直   |
| 副査 | 教授   | 中村  | 孝   |
| 副査 | 特任教授 | 杉山  | 憲一郎 |
| 副査 | 教授   | 佐藤  | 正知  |

## 学位論文題名

### 原子炉系機器の流れによる不適合発生とその恒久対策に関する研究

2011年3月11日、福島第一原子力発電所においては、炉心を冷却するという重要な機能を失うことになり、放射能の閉じ込め機能の喪失という深刻な事態に陥った。この事故についての分析や、原子力安全の確保のために、これからやらなければならない対策は今後の検討にゆだねるが、他の原子力発電所の運転を継続するためには、原子力発電システムとしての安全性・信頼性を向上させるため努力が必要である。1966年の日本原子力発電東海発電所の稼働以来、約700件と多くの不適合を克服してきた。不適合の件数は、年間約1件/基を越える不適合発生件数は、40年を経た現在では、年間約0.2件/基程度にまで減少してきている。

なかでも、沸騰水型原子炉(BWR)の再循環ポンプは、(1)圧力脈動に起因する溶接部の疲労き裂、(2)主軸の熱疲労が発生した。更に、改良型沸騰水型原子炉(ABWR)においては、応力腐食割れが多発した再循環系配管を削除するという抜本的な対策のために、炉内内蔵型の再循環ポンプ(インターナルポンプ)を採用したが、初号機の試運転中に(3)主軸が振れ回るホワール現象が発生した。沸騰水型原子炉においては再循環ポンプは炉心の出力制御や燃料の冷却に直接関係しており、このシステムの安全性・信頼性確保は重要である。そこで、本研究では、これらの重要な不適合事象を対象として、以下の3つの現象のメカニズムを解明とその評価法の確立、恒久対策を得ることを目的として研究を実施した。

- (1) ポンプの羽根車の回転により発生する圧力脈動の評価法と対応策
- (2) ポンプの回転軸の軸封部間隙での高温低温水の混合による熱疲労の評価と恒久対策
- (3) 縦型ポンプの不安定解析と適正な軸受構造の評価

第1章「緒論」では、研究の背景、研究目的、従来の研究の概要と本研究の位置付けと研究方針について述べた。

第2章では再循環ポンプの羽根車の回転により発生する、ポンプの脈動による構造励振(共振

現象)の評価法と構造健全性の確保のための方策の考え方を示した。この事象は、ポンプの羽根車の一部を損傷させ、ポンプを停止させるばかりではなく、その破片を炉内に流入させた。このような事象を再び起こさないために、ポンプの羽根車の回転に伴って発生する圧力脈動を回避するため、ポンプの羽根車の周囲に圧力脈動の周波数に一致する構造を置かないこと、また、たとえ共振しても構造健全性が十分に保てるものとする、などの評価法と恒久対策を得た。

第3章では、ポンプの回転軸の軸封部間隙での高温低温の二温度水の混合による熱疲労の評価と恒久対応策を研究した。ポンプの軸封部の構造のような微小間隙構造部での温度差の大きな二流体の混合では、構造材料表面に温度変動による熱疲労が発生する。そこで、循環する熱水と冷却用のパージ水の混合部近傍に発生する熱疲労の発生予測法を導出し、これを基に恒久策としてケーシングカバー内にパージ水を徐々に加熱して温度差を低減する構造を提案した。

第4章では、縦型ポンプの流体軸受けの不安定性問題である。この縦型ポンプでは、吐出流れが直接高速流で炉内に流れ込むことから、炉内構造の流動振動に対する構造健全性の確保が必要である。本研究では、軸流型の縦型ポンプにおいては、軸流はスラスト力を生むがラジアル力は小さいことを計算流体力学 (CFD) コードを用いた解析により突き止めた。特に、軸受構造の回転軸にクラッド (水垢) が付着すると不安定となり、ホワール振動を発生することを解明し、これを実験により検証した。更にこの抜本的な対策としてハウジングとディフューザとの微小間隙部に複数のグループを設けることで、安定な流体軸受構造を得た。この改良型のポンプが最新鋭の原子力発電所の再循環ポンプとして使用され、安定な運転が継続している。

第5章では、本研究で得られた成果を総括している。原子炉再循環システムの主要機器である再循環ポンプの健全性を確保することは、この系統の重要な機能である炉心燃料を冷却する機能を確保するものである。ポンプの圧力脈動によるポンプ内部構造の損傷・破損や、ポンプの主軸の熱疲労や振れ周りによる主軸の損傷は、重大な事故につながりかねないものであり、このシステムの安全が原子力発電所全体の安全に影響することから、事象の再発を防止する恒久対策が極めて重要である。本研究では、理論的な想定から解析を行うことと、実験や検査によるデータを分析することとを合わせて、現象のメカニズムを同定して、実態に合った適切な評価法を導出した。それにより、再び同様の不適合を起こすことのない構造を得ることができた。更に著者は、類似の不適合事象の発生を防ぐべく、脈動の伝播による疲労損傷の評価、熱疲労の発生評価などを展開し、対策の構築に役立てると共に、改良品の輸出による恒久対策の国際展開や学会標準の策定にも貢献した。

これらの新知見は、原子力工学の発展に貢献するところ大なるものがあり、優れた学位論文である。依って、著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。