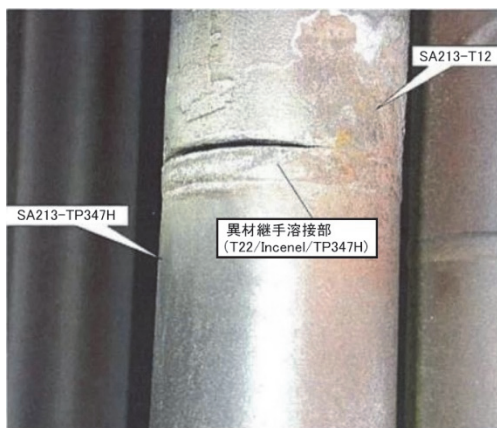


# ボイラ伝熱管低合金鋼異材継手溶接部の保守管理技術の開発

## Development of Maintenance Guideline for Dissimilar Metal Weld of Low-Alloy Steel Boiler Tube



本田 雅幹\*1  
Masaki Honda

本田 尊士\*2  
Takashi Honda

池村 大成\*3  
Taisei Ikemura

近藤 学\*4  
Manabu Kondo

三菱重工グループ(以下、当社グループ)は、損傷メカニズムが解明されておらず、世界的にも共通問題となっているボイラ伝熱管異材継手溶接部の融合部損傷に関し、冶金学的調査や FEM (Finite Element Method) によるクリープ解析を用いて、損傷影響因子の抽出と損傷メカニズムの立案に関する研究を行った。また、立案した損傷メカニズムに基づき、伝熱管低合金鋼異材継手部の融合部損傷に対する保守管理技術を開発した<sup>(1)</sup>。

### 1. はじめに

火力発電設備の主要機器の一つであるボイラの伝熱管は、高温・高圧の厳しい環境下で使用されることが多く、伝熱管異材継手溶接部では母材と溶接部の融合部に沿ってき裂が発生・進展する融合部損傷が起きる(図1)<sup>(2)</sup>。過去の当社グループの事例では、補修溶接を施工した異材継手でのみ損傷が生じていたため、継手製造時に補修溶接を許容しない等の対策を講じてきたが、2015 年以降、補修溶接部以外でも長時間使用後に本損傷が発生する事例が確認されている。また、EPRI (Electric Power Research Institute) 等の報告<sup>(3)</sup>によると、当社グループの製造ボイラに限らず、他社でも同様の損傷が発生しており、世界的にも共通問題となっている。

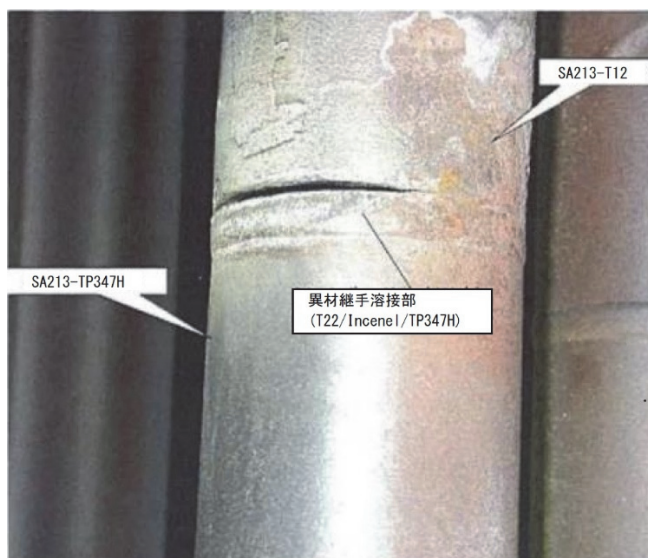


図1 異材継手溶接部の融合部損傷の例

\*1 総合研究所 サービス技術部  
\*3 総合研究所 強度・構造研究部

\*2 総合研究所 強度・構造研究部 工博 技術士(機械部門)  
\*4 三菱パワー株式会社 サービス本部 長崎サービス部

このように、ボイラ伝熱管の異材継手溶接部は、融合部損傷問題が顕在化しているが、その発生条件や損傷メカニズムは解明されておらず、リスク評価や検査技術などの保守管理技術の確立が急務である。

## 2. 損傷形態

ボイラ伝熱管低合金鋼異材継手溶接部に生じる融合部損傷の断面観察結果を図2に示す。本損傷は、低合金鋼側の溶接融合部にポイド(空孔)が発生し、それらがき裂となり、融合部に沿ってき裂が進展する。ポイドやき裂の発生位置は、厳密には融合部から数 $\mu\text{m}$ 程度、低合金鋼側に離れた場所が多い。また、溶接金属と母材との原子拡散に伴い、融合部近傍に列状の析出物や脱炭層(図3)が生じていることも本損傷の特徴である。

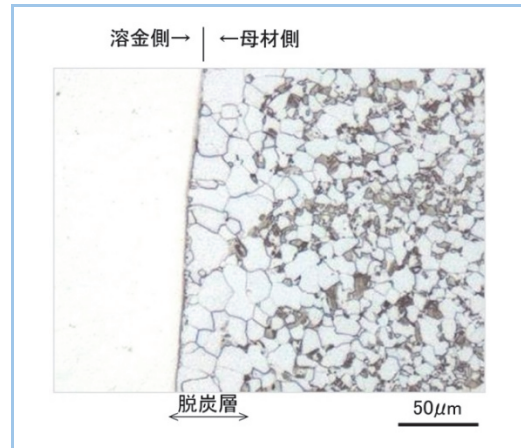
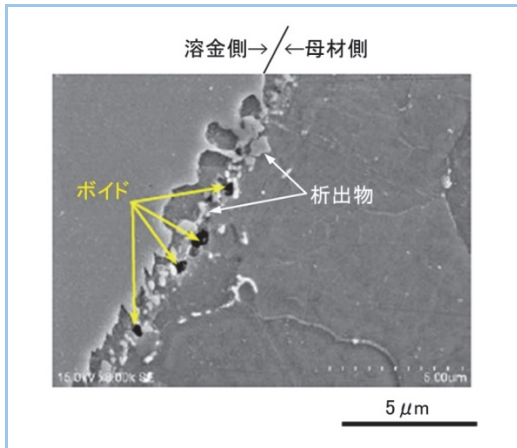


図2 走査型電子顕微鏡による融合部損傷の断面観察例

図3 融合部近傍に生成する脱炭層の観察例

## 3. 損傷事例

融合部損傷の代表事例を図4に示す。当社グループがこれまで経験した損傷事例では、過熱器管の異材継手溶接部でのみ損傷が発生しており、再熱器管の異材継手溶接部では損傷は生じていない。なお、本損傷は、漏洩事故にまで至った事例が少ないことから、稀に生じる事象であると認識していたが、近年、図4に示すようにUT(Ultrasonic Test)検査によってき裂が検出されたケースもあり、保守管理の対象とすべき損傷である。

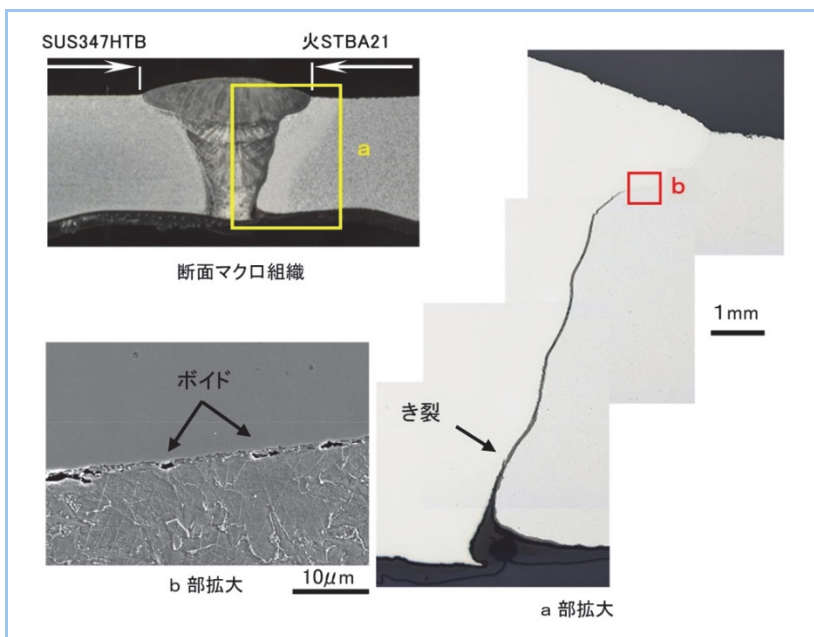


図4 UT 検査で検出されたき裂の例

## 4. 損傷への影響因子

本損傷のメカニズムを検討するために、まず本損傷に影響を及ぼす因子の特定を試みた。具体的には、損傷材と未損傷材の設計条件・運転条件の比較整理、また、断面調査・化学分析等の冶金学的調査等を行った。冶金学的調査を行う中で、過熱器管と再熱器管の HAZ (Heat Affected Zone) 部の組織構成に違いがあることが分かった(図5, 図6)。ここで、上述の通り、再熱器管の異材継手ではこれまでに損傷が起きていないことから、この組織構成の違いが影響因子の一つであるとの仮説を立てた。

本仮説の検証のために、組織構成以外の条件を全て揃えた FEM による弾性クリープ解析を行った。FEM 解析の結果、組織構成が異なることで、き裂の発生・進展に必要な軸応力に差異が生じることが明らかとなり、組織構成の違いが損傷の一因となりうることが分かった(図7)。また、いくつかのモデルを作成し FEM 解析をした結果、ベースとなる作用応力(内圧による軸応力)が高いほど、融合部に作用する軸応力が高くなることも分かり、この作用応力の大きさも影響因子の一つとなり得ると考えられた(図8)。

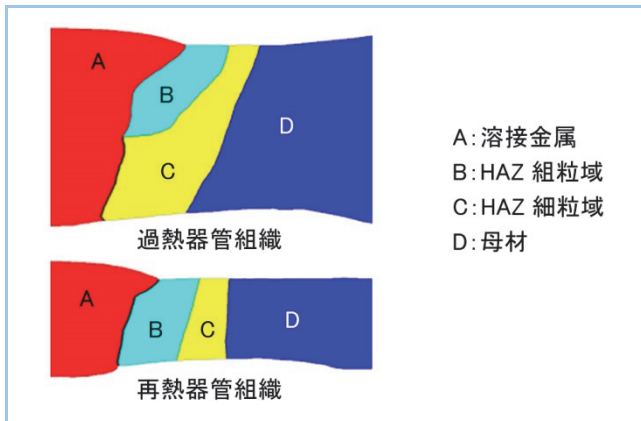


図5 過熱器管組織と再熱器管組織の違い

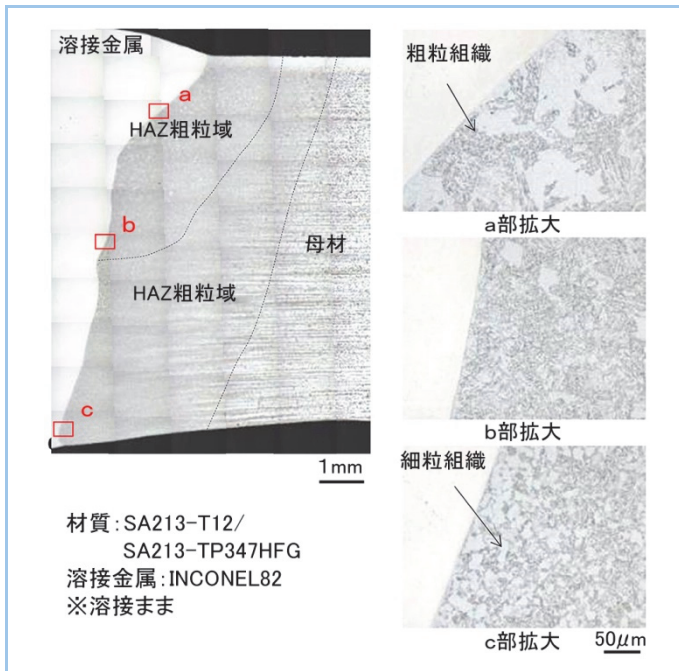


図6 過熱器管組織の代表例

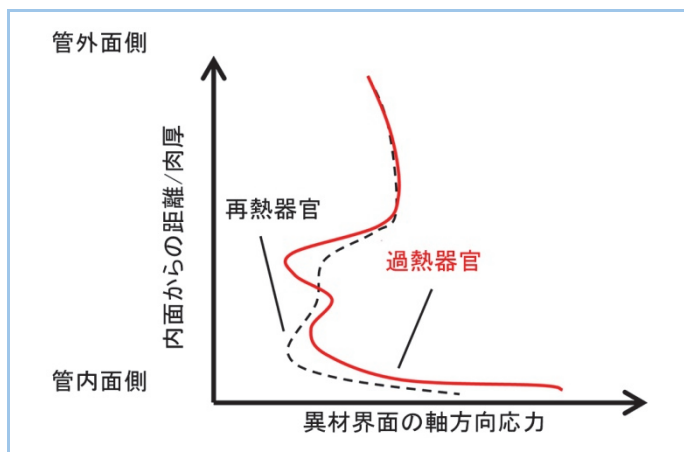


図7 FEM 解析結果のイメージ

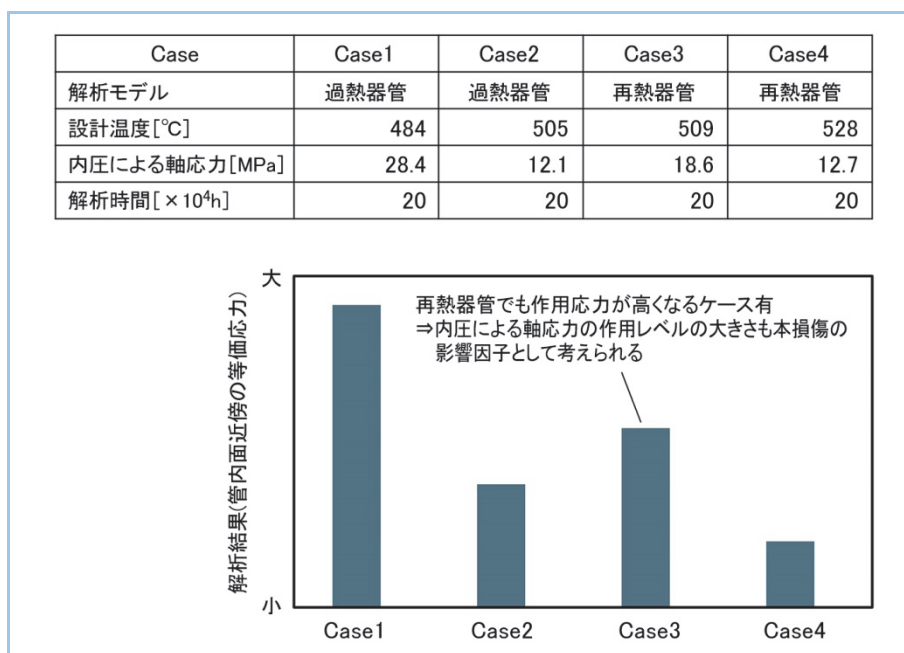


図8 複数のモデルを用いた FEM 解析結果の比較

## 5. 損傷メカニズム

上述の損傷影響因子を踏まえ、ボイラ伝熱管低合金鋼異材継手溶接部の融合部損傷メカニズムを検討した。現時点で推定される損傷メカニズムを以下に示す。

- ① 伝熱管異材継手溶接部は、過熱器管と再熱器管で組織構成が異なる(図5, 図6)。ここで過熱器管では、界面近傍の管内面側から管厚中央部にかけて HAZ 細粒域が位置しており、低合金鋼異材継手部における HAZ 細粒域のクリープ変形抵抗は、HAZ 粗粒域のクリープ変形抵抗より高いため<sup>\*</sup>、運転中のクリープによる応力再配分が起き、管内面側あるいは管厚中央付近に高い軸応力が生じる(図7)。なお、この軸応力は、内圧による軸応力だけでなく、ステンレス鋼・溶接金属と低合金鋼との熱膨張差に伴い生じる引張の曲げ応力を含む。
- ② 過熱器管は再熱器管に比べ一般的に、公称肉厚と t<sub>sr</sub>(thickness shell requirement: 必要最小厚さ)の差が小さく、損傷因子として述べた内圧による軸応力も相対的に高くなるケースが多い。
- ③ 過熱器管では、融合部の管内面側あるいは管厚中央付近の応力が高くなることに加え、周りの組織よりもクリープ変形抵抗が小さい脱炭層が存在するため、クリープひずみが蓄積しやすくなる。なお、この脱炭層は溶接時の入熱による溶接金属と母相との原子拡散により

生じ、過熱器管、及び再熱器管のいずれにも観察される。

- ④ さらに、母相と溶接金属間の Cr 濃度の差等により、脱炭層領域内に  $M_{23}C_6$  や  $M_6C$  等の析出物が主に列状に生成する(図9)。
- ⑤ 運転中のクリープひずみの蓄積により、脱炭層内に析出した析出物と母相の界面に原子空孔が集積しやすくなることで、クリープポイドが優先的に生成する(図9)。
- ⑥ ポイドの生成が進むとポイド同士が連結し、最終的に微視き裂の発生・進展、破断に至る。なお、本損傷については、同じ管仕様や使用条件でも損傷度に違いが出ることもあり、その理由やメカニズムまでは、現時点では明らかになっておらず、継続研究が必要である。

※ 1Cr 鋼異材継手溶接部組織のクリープ変形抵抗を確認するため、1Cr 鋼異材継手から HAZ 粗粒域と HAZ 細粒域双方の微小な試験片を採取しクリープ特性を調査した結果、HAZ 粗粒域の方が、クリープ変形抵抗が低いことが確認された。

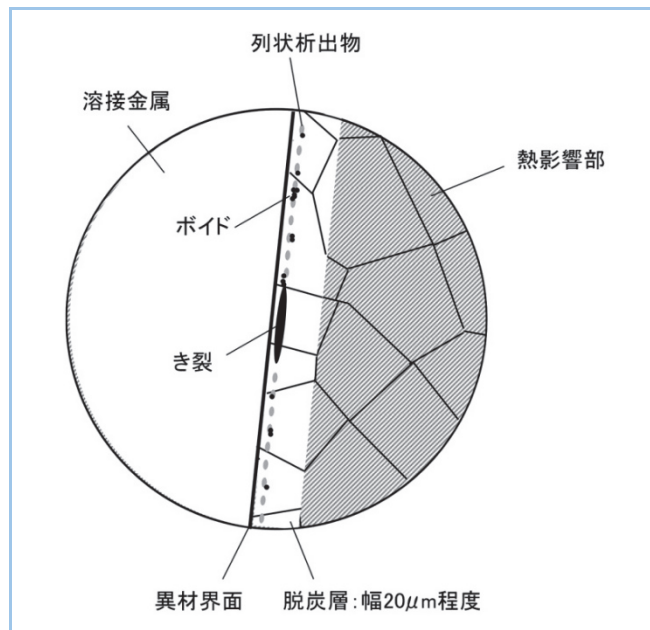


図9 損傷部の模式図

## 6. 保守管理技術

これまでに述べた影響因子や損傷メカニズムに基づき、ボイラ伝熱管低合金鋼異材継手溶接部の融合部損傷に対する保守管理技術を検討し、損傷未然防止に有効な保守管理要領を策定した。保守管理要領の概要を図10に示す。

この保守管理要領の内、今回開発した統計的リスク評価手法について以下に述べる。本評価手法では、4章で述べた影響因子やいくつかの使用条件と、実際の損傷事例を機械学習し、学習モデルを構築する。この学習モデルを用いて、管仕様及び使用条件を含むデータを解析することで、管仕様・使用条件ごとの損傷発生リスクを相対的に評価できる。本手法では損傷に影響する因子を学習データの変数に取り入れたことで、精度の高いリスク評価が可能であり、膨大な異材継手の中から優先して検査すべき対象を順位付けできる。さらに、検査結果を定期的に追加学習することで、リスク評価精度の向上が可能となる(図11)。

また、本損傷は肉厚の内部あるいは管内面側から発生することが多いため、検査には UT を採用した。UT 検査には当社で設計した薄型 UT プローブ等を用いており、シミュレーションや実機検査結果等から、独自の探傷感度ときず検出基準値を定めている。これにより、検出下限値 1mm できずの探傷が可能である。

このように、統計的なリスク評価や UT 検査等を組み合わせた保守管理技術の活用により、ボイラ伝熱管低合金鋼異材継手溶接部の損傷未然防止と保守コストの削減が期待できる。

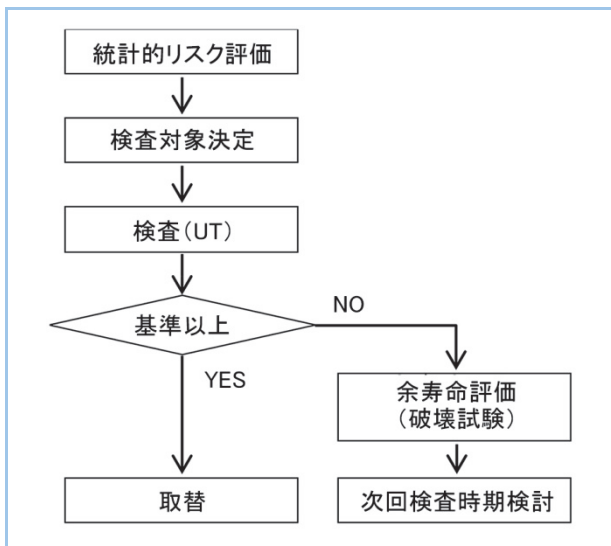


図 10 低合金鋼異材継手溶接部の融合部損傷に対する保守管理フローの概念図

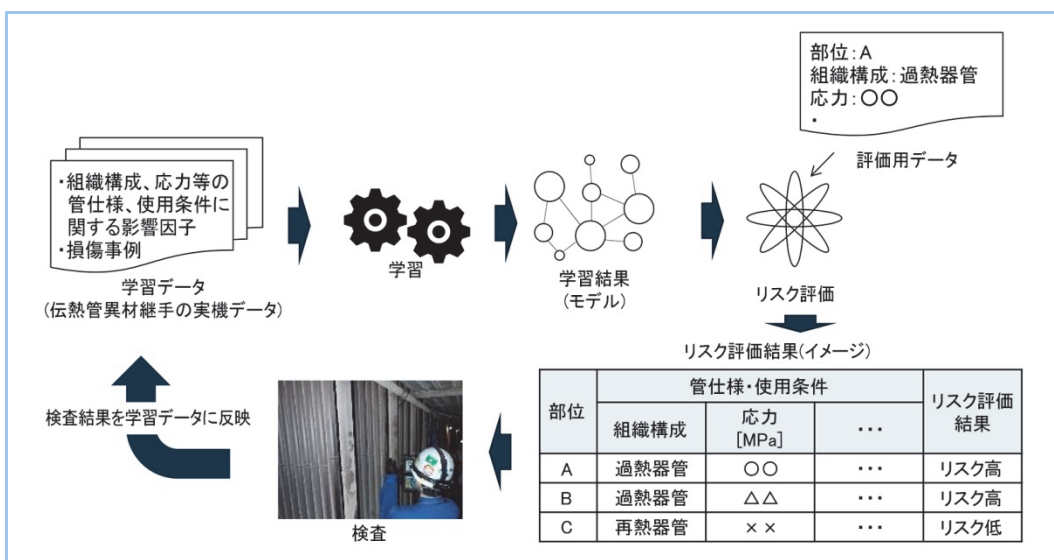


図 11 統計的分析によるリスク評価イメージ

## 7. まとめ

ボイラの伝熱管異材継手溶接部の融合部損傷に関しては、損傷メカニズムが解明されておらず、世界的にも共通問題となっている。この問題に対し当社グループでは、損傷材と未損傷材を対象にした冶金学的な調査や FEM によるクリープ解析等により、いくつかの損傷影響因子を抽出し、有力な損傷メカニズムを提唱した。また、損傷メカニズムに基づく保守管理技術を確立した。

本損傷に関しては、未だ不明な点もあることから引き続き研究を行うとともに、確立した保守管理技術を用いて、損傷の未然防止、ひいてはボイラの信頼性向上に貢献する。

## 参考文献

- (1) 本田雅幹ほか, ボイラ伝熱管低合金鋼異材継手溶接部の融合部損傷と保守管理要領, 火力原子力発電, Vol.71 No.1(2020), p.29~33
- (2) EPRI Boiler and Heat Recovery Steam Generator Tube Failures: Theory and Practice, Volume3: Steam-Touched Tubes, Fig.47-14
- (3) EPRI Workshop Dissimilar Welds in High Temperature Applications, ASME PVP(2017) conference <https://archive.asme.org/events/pvp2017/program/epri-workshop>