

## 溶接管理技術者の体験紹介

# ボイラ主蒸気配管溶接部における クリープ損傷調査 (余寿命診断)

神鋼検査サービス株式会社  
山口 裕 紀

### 1. はじめに

私は、神鋼検査サービス株式会社の材料調査部門にて、溶接欠陥発生原因調査、構造物の劣化調査、破損調査などを行っている。これらは溶接施工管理の業務ではないが、溶接に関する調査を行うためには、溶接管理技術者に求められる技術知識が必要となる。

ここでは、溶接部の劣化調査の内、クリープ損傷調査時の経験、直面した技術的課題、それらを解決するために取り組んだ活動を紹介するとともに、本事例検討途中およびその後の人的交流により技術者としての成長を体感した経験についても紹介する。

### 2. 事例の背景と概要

紹介する事例は、某事業所において約 30 年間使用された自家発電用ボイラの継続運転可否を判断するための主蒸気配管における余寿命診断に関する調査である。ボイラは高温高圧の蒸気を発生し、タービンに供給する設備で、その余寿命を支配するのは溶接部に蓄積されるクリープ損傷と言われている。

この余寿命診断事例では合計 24 箇所の主蒸気配管クリープ損傷を調査しているが、技術的な評価を行った 1 箇所を取り上げて紹介する。

### 3. 余寿命診断の評価・計測手法

ボイラの余寿命診断に用いられる評価手法と計測手法について、以下に説明する。

#### 1) 評価手法

通産省 (当時、現経済産業省) 資源エネルギー庁の通達 (1999 年) に余寿命診断に関する指針として図 1 に示す破壊試験法、非破壊計測法、解析法の 3 手法が示されている。今回クリープ損傷状況の評価する手法として、本指針に示された非破壊計測法の内、後述するレプリカ法を使ったボイド面積率法を用いた。

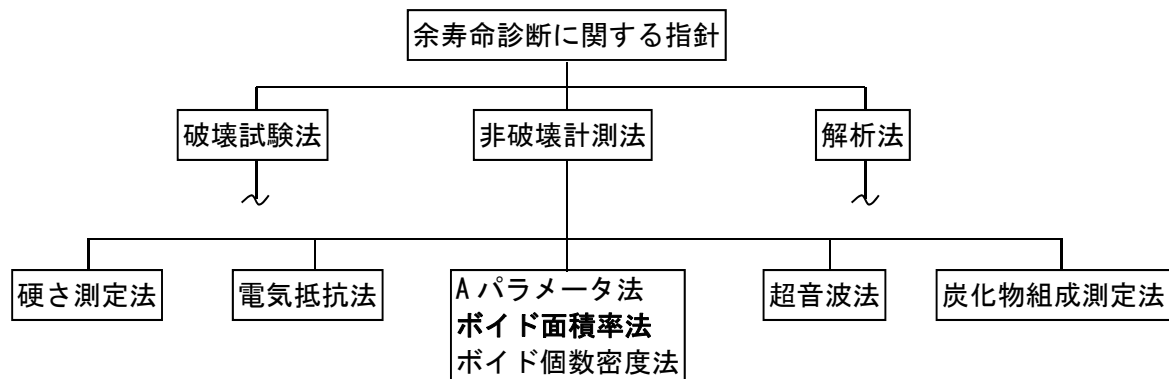


図1 評価手法の選定例

ボイド面積率法は、クリープボイド（以下、ボイドと称する）の発生量を定量化する手法である。その定量化された値としては、後述するボイド面積率（%）などがあり、これらを評価パラメータとして用いて余寿命診断を行う。

ボイドとは、クリープ損傷過程において生じる結晶粒界上に生成される大きさ数 $\mu\text{m}$ の微小穴である。ボイラにおけるクリープ損傷過程は『ボイドの発生・増加→ボイド同士の連結・微視き裂化→巨視き裂』となる。

ボイドの発生量はクリープ損傷寿命と相関があることから、ボイド発生量を計測することで、調査対象の余寿命を推定することができる。

ボイド計測結果（評価パラメータ）は、調査対象の鋼種に応じたマスターカーブに当てはめられ、寿命消費率が評価される（図2）。

マスターカーブは、溶接継手またはHAZ熱履歴再現材を用いて、温度および応力加速した条件で単軸または内圧負荷によるクリープ中途止め試験を行い、計測されたボイド面積率などとクリープ寿命比（寿命消費率）の関係から作成される。マスターカーブは、実施者が準備したもの、あるいは公開論文の中から最適なものを用いる。

評価パラメータ：  
ボイド発生量（単位面積当たりのボイド数やボイド面積）で評価するボイド面積率法あるいはボイドが発生した結晶粒界数を元に評価パラメータを定量するAパラメータ法。

例えば、ある評価パラメータが『0.1』と評価された場合、  
下図のように寿命消費率は60%と評価される。

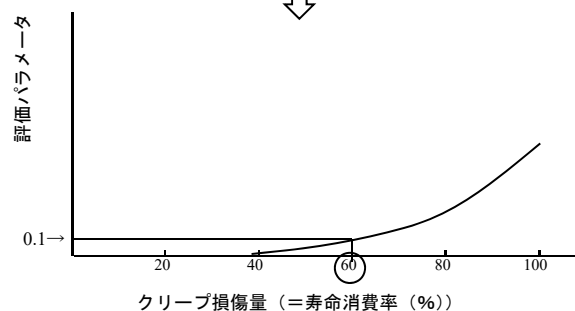


図2 マスターカーブを用いた寿命消費率推定の例

ポイド面積率法は図3に示した手順にて行われる。

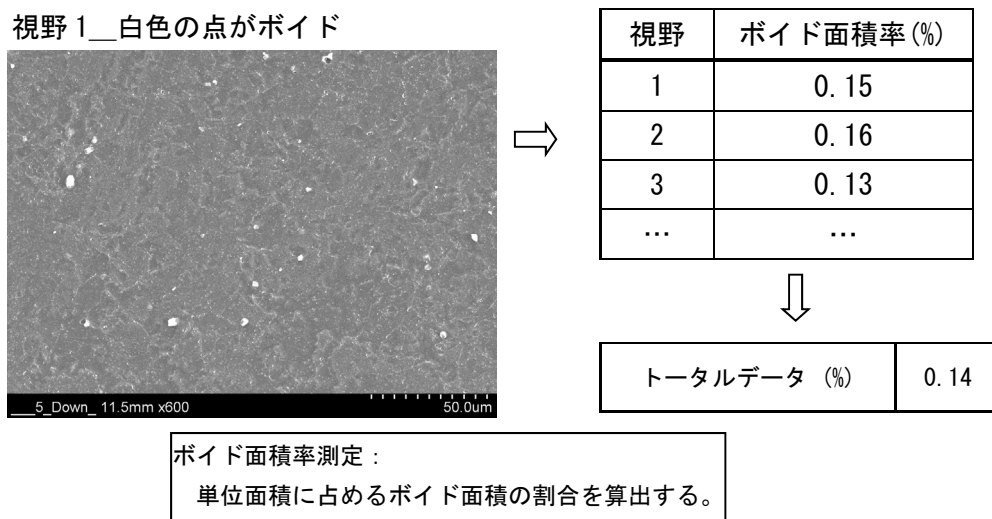


図3 ポイド面積率測定

## 2) レプリカ法によるポイド計測の手法

図4に示すように試験片を切り出すことなく、そのままの状態で行い、組織現出面に対してレプリカフィルムを貼付し、フィルムに転写されたポイドや金属組織をSEM<sup>\*1</sup>観察し、ポイド発生量を計測する方法がレプリカ法である。今回の調査対象は溶接熱影響部(HAZ)である。

\*1) SEM: Scanning Electron Microscope の略。電子線を試料に当てて表面を観察する装置。



図4 レプリカ法

## 4. 調査品

調査品の詳細を以下に示す。

- 1) 調査位置：主蒸気配管 周溶接部
- 2) 材料規格：配管 (JIS G 3458 : STPA24)、バルブ (JIS G 5151 : SCPH32) とともに 2.25Cr-1Mo 鋼
- 3) 運転履歴：設計温度…541℃、設計圧力…12.3MPa、累積運転時間…約 20 万時間
- 4) レプリカ採取位置：図5

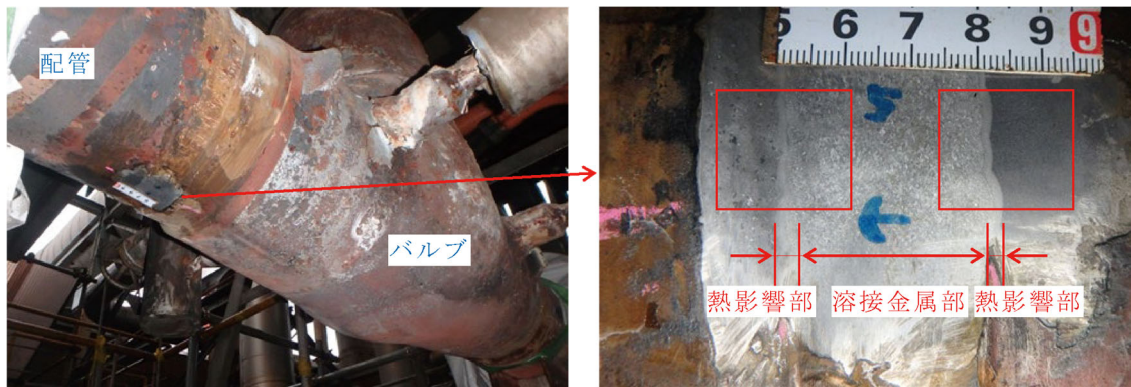


図5 レプリカ採取位置 (口：レプリカ採取位置を示す)

## 5. 調査結果

レプリカ SEM 観察の結果、周溶接のバルブ側 HAZ 粗粒域（以下、HAZ 粗粒域と称する）と HAZ 細粒域にボイドと考えられる微小穴が観察された（図6）。

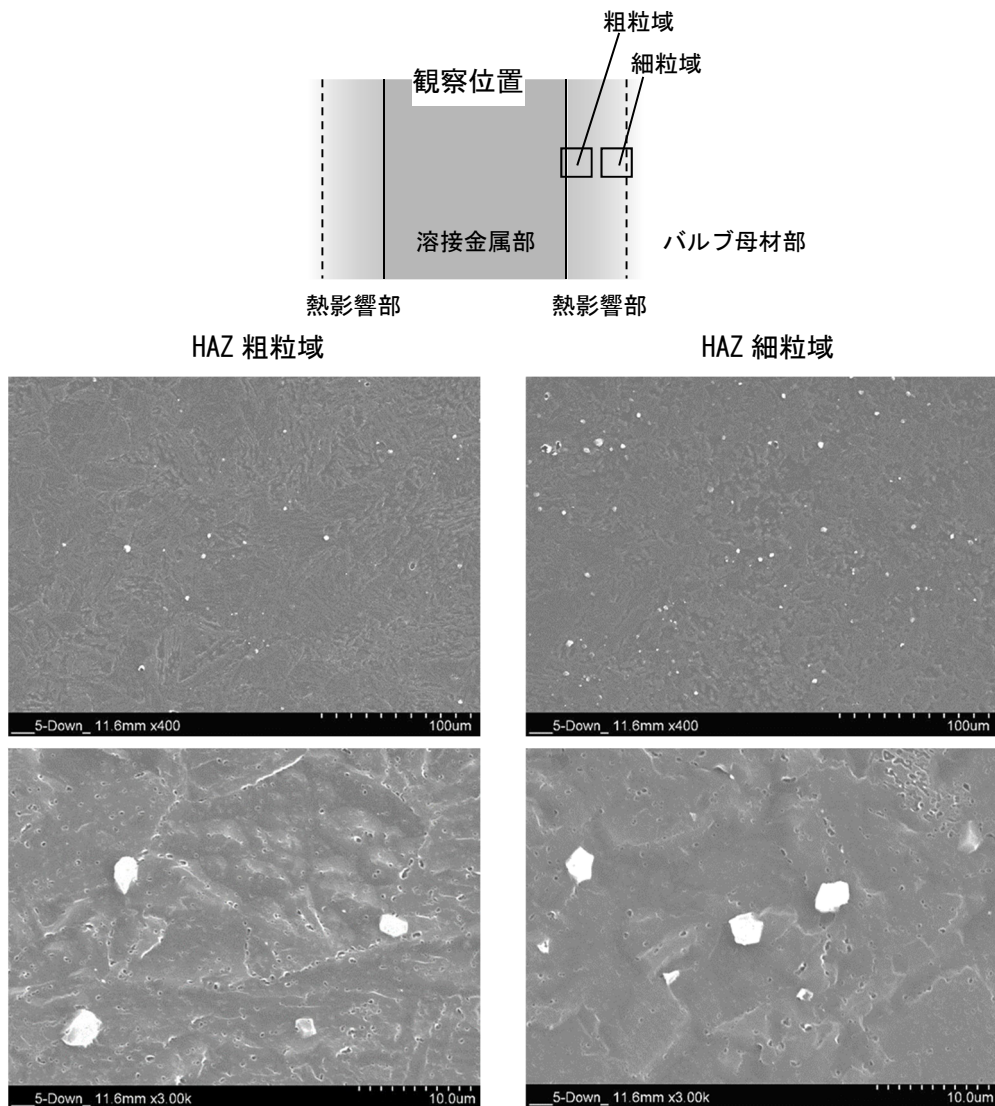


図6 レプリカのSEM観察結果

HAZ 粗粒域と HAZ 細粒域におけるボイド発生量を比較すると、HAZ 粗粒域に比べて、HAZ 細粒域により多くのボイドが発生していた。当該位置の損傷は図 7<sup>1)</sup> に示す HAZ 細粒域でクリープ損傷が顕著となるタイプ IV 損傷と考えられた。

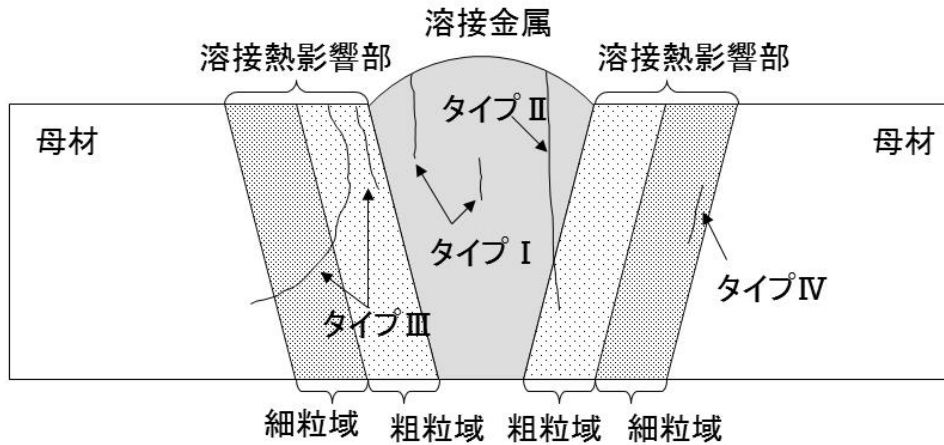


図 7 溶接継手部クリープ損傷の分類<sup>1)</sup>

HAZ 細粒域におけるクリープ損傷状況を定量評価するために、ボイド面積率を測定した結果、当該位置のボイド面積率は 0.14 (%) であった。この結果を、引用したマスターカーブ (図 8) に当てはめると寿命消費率 100%を示すボイド面積率 0.09 (%) 以上であることから、その寿命消費率は 100% (余寿命ゼロ) と評価された。

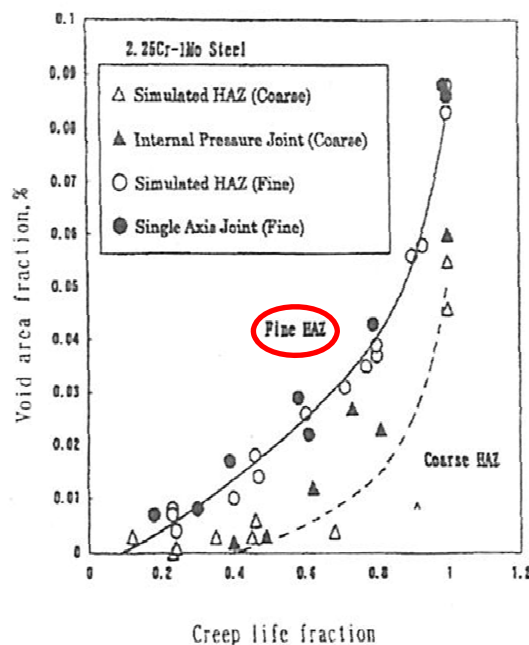


図 8 引用した HAZ 細粒域クリープ損傷マスターカーブ<sup>2)</sup>

## 6. 評価上の技術的課題

レプリカ法によるボイド観察の結果、HAZ 細粒域に多数のボイドが検出され、ボイド発生量から推定される寿命消費率は 100%となり、予想をはるかに上回る消費率であったため、この結果の妥当

性を慎重に評価する必要があった。1)～3)に評価上の技術的課題を、4)に追加検査結果を、5)にそれらのまとめを示す。

### 1) マスターカーブ

ボイド発生状況から余寿命評価を行うためにはマスターカーブが必要である。しかし、調査当時に準備していたマスターカーブはボイドが発生した損傷粒界数と総観察粒界数の割合を求める評価手法である A パラメータ法 (3 章-図 1、図 2 に示した非破壊計測法の 1 つ) のみであった。

HAZ 細粒域における結晶粒サイズは数  $\mu\text{m}$ ～10  $\mu\text{m}$  であり、HAZ 粗粒域結晶粒サイズの 1/10 程度であるため、HAZ 粗粒域と比較して粒界の判別が難しく、従来から言われているように HAZ 細粒域では A パラメータを求めること自体が困難であった。このことから、本事例においても A パラメータは、図 9 に一例を示すように結晶粒界とボイドが容易に判別できる HAZ 粗粒域における損傷には利用できるが、HAZ 細粒域についてはボイド面積率の方が損傷計測の指標となると判断した。

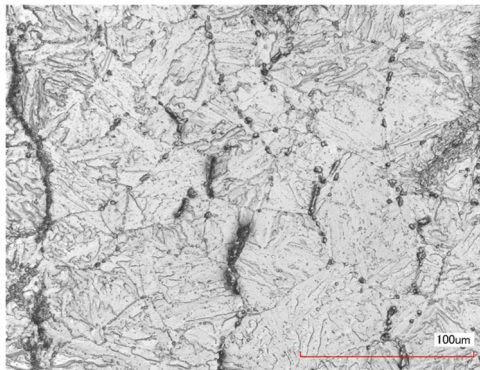


図 9 HAZ 粗粒域におけるクリープ損傷の例

ボイド面積率によるクリープ損傷評価に関する技術情報の探索を行い、日本機械学会論文集<sup>2)</sup>(以下、機論と称する)に掲載されている HAZ 細粒域を対象とした実験データが最も参考にできる公開論文であると判断し、図 8<sup>2)</sup>に示したマスターカーブを評価に用いた。機論以外のマスターカーブとしては、図 10<sup>3)</sup>に示すものが公開されているが、HAZ 粗粒域を対象としたマスターカーブであった。

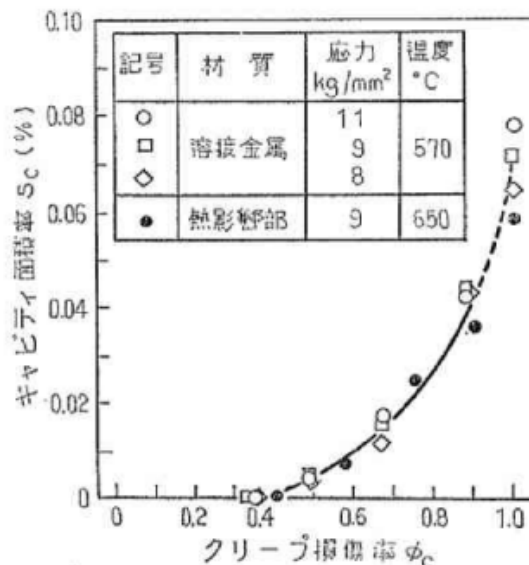


図 10 ボイド面積率を用いたマスターカーブの例<sup>3)</sup>

## 2) タイプⅣ損傷 (HAZ 細粒域ボイド発生)

今回の調査以前までに筆者が経験したクリープ損傷形態はタイプⅢ損傷 (HAZ 粗粒域の損傷) のみであり、タイプⅣ損傷は経験がなかった。そこで、本事例がタイプⅣ損傷と判断することが妥当であるか否かを検討した。

HAZ 細粒域でボイドが発生するか否かについては、主応力の方向に依存するとされている<sup>2)</sup>。引用した機論によると、周溶接線と同一方向 (周方向) に主応力が加わると HAZ 粗粒域でボイドが発生し易いと言われている。配管が内圧を受けて膨らむ場合の主応力は周方向応力である。一方、周溶接線と直角方向 (軸方向) に主応力が加わると HAZ 細粒域でボイドが発生し易くなると言われている。配管の軸方向への熱膨張が拘束される場合に発生する熱応力が軸方向応力である。

今回、HAZ 細粒域で顕著にボイド発生が認められた溶接線はバルブ+配管のバルブ側であり、バルブの拘束により周溶接線と直角方向の軸方向応力が影響していた可能性は十分に考えられる。このことから、本事例がタイプⅣ損傷と判断するのは妥当であると考えた。

## 3) 寿命消費率 100% (余寿命ゼロ) の妥当性

機論のマスターカーブに調査結果を当てはめると寿命消費率 100% (余寿命ゼロ) と評価された。直感的に微視き裂が生じていない状態で寿命消費率 100%との評価は、過度に破壊の危険性を考慮した安全側の評価のように思えるが、以下の理由によりその評価は妥当なものと考えられる。

HAZ 細粒域の断面におけるボイドの分布は、HAZ 粗粒域のそれとは異なることが知られている<sup>2)</sup>。引用した機論によると、HAZ 細粒域の断面では、ほぼ一様にボイドが見られ、やや肉厚内部の方が表面よりもボイドが多く発生しやすい。また、図 8<sup>2)</sup> のマスターカーブから、HAZ 細粒域のボイド発生量は HAZ 粗粒域よりもかなり多くなることが分かる (例えば、寿命消費率 80%における HAZ 細粒域と HAZ 粗粒域のボイド面積率は 3 倍程度異なる)。ボイドが多量に発生する HAZ 細粒域は HAZ 粗粒域よりも破壊危険度が高いと考えられる。

肉厚内部にボイドが多量に発生している場合、き裂の発生・成長が見られずに、急進的な破壊に至ることがあり得る。よって、今回得られた寿命消費率 100%は安全側の妥当な評価であると思われる。なお、肉厚内部でボイドが発生するか否かの検証には、FEM による当該部の応力解析を行い、損傷最大位置が外表面か肉厚内部かを明らかにする必要があるが、本案件ではそこまでの検討はしていない。

## 4) 並行して実施した非破壊検査結果

本調査結果を受けて、肉厚内部の損傷有無を確認するために超音波探傷検査 (マニュアル UT) による非破壊検査を実施した。併せて、磁気探傷検査 (MT 検査) も実施した。

### 4-1) MT

MT による指示模様は検出されなかった。

### 4-2) マニュアル UT

UT の結果、製作当時のものと考えられる判定基準 (発電用火力設備の技術基準の解釈) に合格する程度のきずは検出されたが、ボイドが連結し、大きなサイズのき裂となったような指示は検出されなかった。

## 5) 検討のまとめ

今回 HAZ 細粒域にボイドが観察された箇所はバルブ側 HAZ 部であり、バルブの拘束による応力条件の下、タイプⅣ損傷が生じていることは十分に考えられる。当該部の応力状態は未解明である

が、タイプIV損傷の一般的な損傷過程すなわち内部が優先的に損傷し、き裂発生後、急進的な破壊が発生する可能性を考慮し、寿命消費率 100%と厳しい側の評価は妥当と考えられた。

## 7. 技術課題の解決のための活動と技術者としての成長

本事例を推進する中で、私自身が技術者として大きく成長することができました。また、以降の業務でも本件で培った対応力が大いに役立ちました。ここに、その体験を紹介します。

### (Step1：技術情報の探索と現場で発生している事象との照合)

調査当時、私は初めて上述した 2.25Cr-1Mo 鋼のタイプIV損傷に出会いました。そこから、技術情報を探索し、そこで得られた情報をもとに、寿命消費率 100% (余寿命ゼロ) という結果を得ました。その妥当性を検討するために、最も参考になった機論に掲載された写真や表、グラフから、ボイドの大きさやその分布を新たな表にまとめて、他にも有益な情報は得られないか模索しました。課題に直面することで、探求心が向上し、それを原動力として課題解決に向けて邁進できることを体感しました。

### (Step2：トップランナーとの出会い)

暗中模索する中、たまたま目にした技術雑誌をきっかけにクリープ損傷研究のトップランナーである二人の先生に出会いました。お二人に相談に乗っていただき、知識や経験談を教授していただいたことにより、本調査を推進することができました。

### (Step3：先輩技術者との交流、そして自身の成長)

この相談をきっかけに、先生から余寿命診断技術評価ワーキンググループ (以下、WG) に参画してみないかとお誘いをいただき、参画することになりました。当時は、クリープ試験を行ったことがなく、クリープ損傷の理論部分が私の弱点でした。一方、私の強みは現場で実際に起こっている事象を自分の目で見てきたことでした。約 15 年に亘って稼働後 30、40 年の高経年ボイラのレプリカ採取を行い、その中で、クリープ損傷で蒸気漏洩したき裂や漏洩に至る前のクリープ損傷き裂を多数目のあたりにし、それらを様々な技術論文と照らし合わせてきました。この現場経験をもとに WG に参画し、議論に参加してみようと考えました。先生からは、『現場経験を積んで、それに続いて理論を勉強するような経験の積み方も普通と違って、良いじゃないか、山口さんのような現場目線でどんどん議論に参加して欲しい。』との言葉をいただきました。

この WG 活動を通して、自分よりも多くの経験を積まれた技術者の方々と活発な議論を重ね、技術者として更に成長できました (現在、進行形です)。

### 参考文献：

- 1) 増山不二光ほか、「溶接構造物の寿命予測」, 非破壊検査, 第 44 巻, 第 7 号, pp.477-484 (1995)
- 2) 西田秀高ほか、「ボイラ溶接部のクリープボイド発生・成長挙動に基づく余寿命評価の高精度化」, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.66, No.649, pp.1657-1665 (2000)
- 3) 坂口安英ほか、「ボイラ材料の非破壊的余寿命診断技術の開発」, 火力原子力発電, Vol.39, No.6, pp.653-664 (1988)

<略歴>

**山 口 裕 紀 (やまぐち ゆうき) 溶接管理技術者特別級**

---

- 2008年 兵庫県立姫路工業大学 工学部 材料工学科 卒業  
2008年 神鋼検査サービス(株) 材料調査室 材料試験に従事  
2013年 神鋼検査サービス(株) 機器 QA 室  
神戸製鋼所で製作される圧力容器の品質管理業務に従事  
2016年 神鋼検査サービス(株) 技術部 技術開発グループ (材料調査チーム)  
材料試験、各種破損・損傷調査、ボイラなど余寿命診断の業務に従事

<主な保有資格>

- ・溶接管理技術者 特別級
- ・非破壊試験技術者
  - 放射線透過試験 レベル3
  - 超音波探傷試験 レベル3
  - 磁気探傷試験 レベル3
  - 浸透探傷試験 レベル3
  - ひずみゲージ試験 レベル3
- ・CIW 検査技術管理者 (K)
- ・CIW 上級検査技術者 (SR)