

浜岡 1号機原子炉圧力容器に関する研究 —廃止措置プラントを活用した材料研究—

Research on reactor pressure vessel in Hamaoka Unit 1
- Material research utilizing decommissioning NPS -

中部電力(株) 原子力安全技術研究所 熊野 秀樹 Hideki YUYA Member
中部電力(株) 原子力安全技術研究所 大山 正孝 Masataka OYAMA Member

Fact finding survey of actual reactor pressure vessel in decommissioning Hamaoka nuclear power station has been conducted. All boat samples was already transported to a domestic post irradiation examination (PIE) facility. During the PIE, un-irradiated archive materials was also investigated for better understanding of cladding HAZ in base metal, as introduced in the 14th JSM conference. This is the progress report describing some new results obtained after the conference.

Keywords: RPV, Decommissioning, Sampling, Boat sample, Irradiation, Embrittlement

1. 緒言

当社は、2009年に運転を終了した浜岡原子力発電所1号機の原子炉圧力容器の調査研究を2014年度に開始した。本調査は2015年度からは国の補助事業にも採択されている。

実機の調査はサンプリング、輸送およびシャルピー衝撃試験片等の加工に相当な準備期間を要したため、今年度に本格試験が集中している。採取した実機サンプルは原子炉内表面クラディング下の母材であり、この部位に対する過去の調査事例は少ないことから、実機保管材（非照射材）を利用して予備検討を行った。前報では、実機サンプルと保管材（非照射材）の金相や硬さ分布が内表面から圧力容器の厚さ方向に傾斜しているという共通の特徴を見出した。このことから、内面クラディング下の圧力容器母材はクラディング溶接熱影響部（クラディング HAZ）であることが確認できた。

今回、前報からの進捗について報告する。

2. 試験結果

2.1 材料調査

実機の硬さ分布の原因を探るため、保管材を対象にFE-EPMAによる元素分析を行った結果、内面クラディングと母材の境界近傍では、マンガンと炭素の濃度がピークを示すという特徴が見られた。特に炭素は境界近傍に遍在していた。

連絡先:熊野秀樹, 〒437-1695 静岡県御前崎市佐倉5561, 中部電力株式会社 原子力安全技術研究所,
E-mail:Yuya.Hideki@chuden.co.jp

詳細に溶融境界近傍の炭素の線分析を行った結果、溶融境界近傍での炭素のピークの幅が約30 μ mあり、圧力容器側で炭素の枯渇する部分が幅約150 μ m存在する傾向を示した。

溶融境界近傍をTEM観察とEDS分析した結果、元素濃度変化が生じている領域にはマルテンサイト組織に特有の高密度の転位が存在し、細かい線状の模様が見えた。この各元素濃度が変化している領域を詳細に観察した結果、Crが析出していた。面分析の結果、Cr富化領域が島状に分布しており、溶接時に母材側に拡散したと推測した。

これらが実機の硬さ分布の原因と推測した。

2.2 シャルピー衝撃試験

(1) 試験結果

本研究で用いる実機サンプルから採取できるシャルピー衝撃試験片は標準サイズ(10×10×55mm)に対し小型になる。このため、保管材の非熱影響部(母材部)から標準サイズ試験片および1/3サイズ試験片を採取し、サイズ効果を検討した。その後、クラッドHAZの1/3サイズ試験片から、標準サイズ試験片の衝撃特性の予測・評価を行った。

衝撃試験に使用した試験片は以下の3種類である。

- ・母材部(1/4厚さ位置)の標準サイズ試験片
- ・母材部(1/4厚さ位置)の1/3サイズ試験片
- ・クラディングHAZの1/3サイズ試験片

図1に衝撃試験片の形状、表1に衝撃試験片の寸法を示す。クラディングHAZから採取した試験片は、圧力容器鋼内側から6.6mmの位置にノッチ底が位置するように採取した。

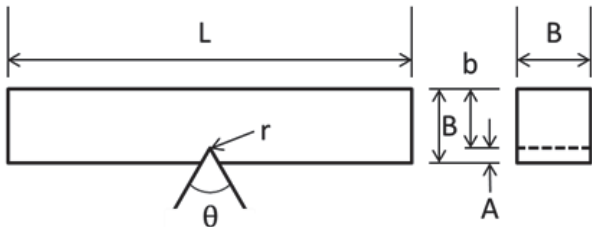


図1 衝撃試験片形状

表1 衝撃試験片寸法

	標準サイズ	1/3 サイズ
L [mm]	55	27.5
B [mm]	10	3.3
b [mm]	8	2.7
A [mm]	2	0.6
θ [°]	45	30
r [mm]	0.25	0.08

試験機は、標準サイズ試験片用の計装化 300J 試験機および微小サイズ試験片用の計装化 50J 試験機で、アンビル間隔はそれぞれ 40mm と 20mm とした。ロードセルはハンマーに埋め込まれており、衝撃力の時間変化を波形解析することができ、この変位-荷重曲線から吸収エネルギーEが分かる。試験片の温度は、77K の時は液体窒素、163K から室温では極低温槽を用いて任意に変化させた。

ハンマーの衝撃負荷速度は300Jの試験機ではJIS通りの5.0から5.5m/secで実施し、50Jの試験機では3.8m/secで実施した。

各温度で得たデータは従来から行われている通り、以下の式でカーブフィッティングした。

$$E = A + B \tanh\left(\frac{T - T_0}{C}\right) \quad (1)$$

E は縦軸の吸収エネルギー、T は試験温度、A、B、C、T₀ は定数である。また各定数間には以下の関係が成り立っている (DBTT : 延性脆性遷移温度、USE : 上部棚エネルギー、LSE : 下部棚エネルギー)。

$$\begin{aligned} A + B &= USE \\ A - B &= LSE \\ T_0 &= DBTT \end{aligned} \quad (2)$$

試験結果をまとめると、試験片サイズの減少とともにDBTT、USEおよびLSEが低下する傾向がある。1/3 サイズ試験片では母材部の USE が高い一方、DBTT は母材部と HAZ の違いは顕著ではなかった。

(2) サイズ効果の検討

USE に対するサイズ効果の補正法に関し、4 研究グループが試験片寸法やノッチ部の応力集中係数 (K_t) を考慮した式を提唱している。それらを本研究結果に適用すると 15~44%の誤差が生じた。これは試験片長さやアンビル間隔に関する考え方が異なっているためである。本研究では、シャルピー衝撃試験時の変位-荷重曲線の詳細な観察結果と試験片がアンビル間を通過するために必要な移動距離 (l) を考慮した以下の(3)式を補正係数として考案した。

$$X = \frac{Bb(B+l)}{K_t} \quad (3)$$

この補正係数により、150J 以上の鋼材に対してはほぼ 10%以下の誤差で予測できた (図 2)。

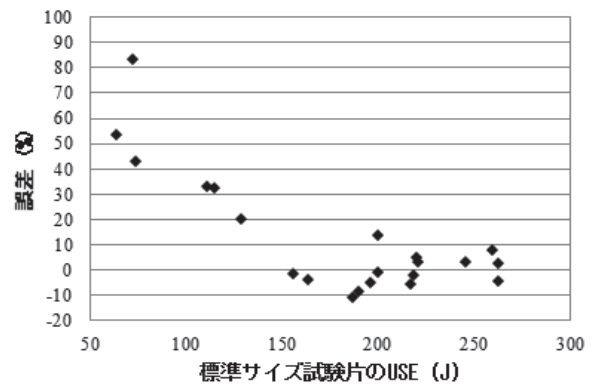


図2 予測した USE と誤差

一方、DBTT に対するサイズ効果についても検討し、12K 以内の精度で補正する方法を考案した。

3. まとめ

- (1)内面クラディング近傍の母材には炭素の偏析増大によるマルテンサイト相形成と Cr 炭化物の析出や Fe/Cr の二相分離が起きていると考えられる。
- (2)衝撃特性に及ぼす試験片寸法の影響については、1/3 サイズ試験片データから標準サイズ試験片データを予測する関係式を新たに開発した。

4. 今後の展開

本研究では、実機サンプルの破壊靱性試験を実施中である。また、実機サンプルの原子プローブ分析も行う予定である。