Journal of the Institute of Nuclear Safety System 2011, Vol.18, 170-180

# 原子炉構造材の非破壊的健全性評価手法の検討(その2)

A Study of Non Destructive Integrity Assessment Method for Structural Materials of Nuclear Reactor - Part 2 -

戸塚 信夫 (Nobuo Totsuka) 松崎 明博 (Akihiro Matsuzaki)



nss 株式会社原子力安全システム研究所

Institute of Nuclear Safety System, Incorporated 〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田64号 Tel 0770-37-9100 Fax 0770-37-2008 URL http://www.inss.co.jp

# 原子炉構造材の非破壊的健全性評価手法の検討(その2)

A Study of Non Destructive Integrity Assessment Method for Structural Materials of Nuclear Reactor – Part 2 –

戸塚 信夫 (Nobuo Totsuka)<sup>\*1</sup> 松崎 明博 (Akihiro Matsuzaki)<sup>\*2</sup>

要約 地震被災後の原子炉構造材の健全性評価および実構造材の実強度を非破壊的に評価する手法として、硬度測定法が最も有力な方法と考えられ、前報においてポータブル硬度計による評価法とその有効性について報告した.本報では当該手法を高度化し、プラントの長期運転時の熱時効による硬度変化と地震時の繰り返し変形による硬度変化について実験し、地震被災時の塑性変形量を硬度測定によりさらに正確に定量評価する手法を検討したので、それについて報告する.

キーワード 原子炉構造材,非破壊検査,硬度測定,塑性変形,ポータブル硬度計,金属組織

Abstract The hardness measurement is one of the most effective way for non destructive integrity assessment evaluating structural materials of nuclear power plants before and after suffering an earthquake. Then an actual evaluation method and effectiveness of the method using portable hardness tester has been reported in the previous Journal. In this study, the developing method which can evaluate more accurately the amount of plastic deformation of the material caused by an earthquake has been reported, based on the experimental results about the hardness change of the material considering the thermal aging due to plant operation and the cyclic deformation suffered by an earthquake.

Keywords Structural Materials of Nuclear Reactor, Non Destructive Integrity Assessment, Plastic Deformation, Portable Hardness Tester, Metallurgical Structure

## 1. 緒言

2007 年 7 月 16 日に発生した中越沖地震で東京電 力柏崎刈羽原子力発電所は想定を上回る大きな地震 動を被り,原子力発電所の耐震性について懸念され る事態となった.<sup>(1)</sup>実際には主要機器において大 きな損傷はこれまでのところ見られていないが<sup>(1)</sup>, そのことをより定量的,実証的に証明するには構造 材料の塑性変形量を非破壊で定量評価することが必 要であり,前報<sup>(2)</sup>で具体的方法としてポータブル硬 度計を用いた硬度測定法が有効であることを報告し た.本報では,この硬度測定法をさらに高度化し, より精度をあげるため,実際のプラントの部位に よっては運転中に受ける可能性のあるくり返し変 形の影響を実験的に評価し,これらの影響を考慮し た構造材料の健全性評価方法を検討した.

#### 2. 実験方法

# 2.1 くり返し変形による材料の硬度, 組織変化に関する実験

供試材は市販の炭素鋼(SS400)と研究室で溶 製したステンレス鋼(SUS304, SUS316)である. 図1に供試材の製造工程および試験・評価項目を 示し,表1に化学成分,図2,3にはそれぞれくり 返し歪付与試験用試験片形状と試験状況を示した. くり返し歪み付与試験は標点距離5mmで,歪み制 御によるくり返し歪みを付与した.試験機は,島 津製作所製Dynamic Servo(10kN),また伸び計は MTS 社製伸び計 Model 632.39F-30 を用いた.また

<sup>\*1 (</sup>株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

<sup>\*2</sup> JFEテクノリサーチ(株) 千葉分析・材料事業部

単純引張歪み付与材と比較するために, 歪み量 0.8% および3%を主体に、くり返し歪み付与試験を実施 した. くり返し回数は, 1, 5, 50回を目標としたが,

座屈、試験機の荷重制限などで一部実施できない条 件もあり、より小さい歪み量またはくり返し回数と なったものもある.



図1 供試材の製造工程および試験・評価項目

成 分 (%) 符号 成分系 С Si Mn Ρ S Al Ni Cr Мо Ν Ο C+N SUS304 0.040 1.01 0.029 0.006 18.59 0.0237 0.0030 А 0.49 0.008 8.80 0.064 2.31 D SUS316 0.036 1.46 0.031 0.0019 0.030 13.3916.47 0.0243 0.0032 0.060 G SS400 0.17 < 0.01 0.46 0.014 0.010  $8.00 \sim$  $18.00 \sim$ 0.08 1.00 2.00 0.045 0.030 SUS304 IIS 以下 以下 以下 以下 以下 10.5020.00 成 1.00 以下 2.00 以下 0.045 以下 0.030 以下  $10.00 \sim$ 2.00~ 0.08 以下  $16.00 \sim$ SUS316 分 14.00 18.00 3.00 範

0.050 0.050

以下

以下

表1 供試材化学成分 (重量%)



囲

SS400

b) 試験片および伸び計の外観

図3 くり返し歪み付与試験の外観

# 2.2 長時間熱時効による材料の硬度, 組織変化に関する実験

原子力発電所のように350℃以下の温度域で鋼材 が使用された場合,大きな組織変化は無いものの, 熱時効による転位組織の変化や微視的な領域での偏 析,析出現象などにより,硬さに影響を及ぼす可能 性がある.したがって,単なる地震動を想定した硬 さの評価のみでは的確な構造物強度,材質変化の評 価ができない恐れがあり,熱時効による微視組織, 硬さの変化挙動を明確にしておく必要がある.そこ で前節と同じ素材を用い予歪なし,3%および10% の引張予歪みを付与した後に,250および350℃で, 3600時間までの長時間時効熱処理を行い,組織と 硬さの変化を調査した.予歪はJIS5号試験片(JIS Z2281)を用いて付与し,その平行部から試料を採 取し,時効試験を行った.

#### 3. 実験結果

# 3.1 くり返し変形による材料の硬度, 組織変化に関する実験結果

2.2 で述べたくり返し歪付与試験用試験片の平行

部から歪付与後試料を採取し,硬度および組織観察 を行った.

#### 3.1.1 くり返し変形による材料の硬度変化挙動,

図4~6に、各くり返し歪み付与試験時の代表的 応力-歪線図および試験後の試験片の硬さ測定結果 を示す.測定部位は、標点距離内の1/4d部L断面で、 HV1kgfで5点測定の平均値である.SUS304および SUS316では、くり返し数および歪み量の増加に 伴い、硬さは上昇する.くり返し歪み付与試験によ る加工硬化の影響と考えられる.

一方, SS400 の歪み量 0.8% では, 1 サイクルま では僅かに硬さが上昇し, その後はくり返し数の増 加に伴いやや低下する. 歪み量 3.0% では, 5 サイ クル目まではくり返し数の増加に伴い硬さは上昇す る. なおこれらの図には, 無負荷時の硬さおよび単 純引張負荷後の硬さも合わせて示してある. 図から 明らかなように, いずれの鋼種においても, 単純引 張歪み付与材の硬さは, 無負荷と1 サイクルくり返 し歪み付与材とのほぼ中間にある.



図4 SUS304のくり返し歪み付与試験時の応力-歪線図,荷重,硬度変化



図5 SUS316のくり返し歪み付与試験時の応力 - 歪線図,荷重,硬度変化



図6 SS400のくり返し歪み付与試験時の応力 - 歪線図,荷重,硬度変化

# 3.1.2 くり返し変形による材料の組織変化挙動 (光学顕微鏡観察)

図7~9に,各くり返し歪み付与後の試験片の代 表的な光学顕微鏡組織を示す.測定部位は,標点距 離内の1/4d部L断面である.SUS304は,くり返 し数の増加に伴い,マルテンサイト組織や変形双晶 が顕著に増加する.これらの組織変化により,加工 硬化を示したと考えられる.一方,SUS316および SS400では,歪み量およびくり返し回数が増加して も,特段の組織変化は認められない.いずれも加工 による変態は起きないため,光学顕微鏡レベルでは 組織変化が認められなかったものと考えられる.



図7 SUS304のくり返し歪み付与試験時の組織変化(光学顕微鏡観察)



±0.8%繰り返しひずみ付与回数

5 旦

50回



図8 SUS316のくり返し歪み付与試験時の組織変化(光学顕微鏡観察)



図9 SS400のくり返し歪み付与試験時の組織変化(光学顕微鏡観察)

#### 3.1.3 くり返し変形による材料の組織変化挙動 (透過電子顕微鏡観察)

各くり返し歪み付与後の試験片から薄膜を作製 し,透過電子顕微鏡により観察した微細組織の代表 写真を図10~12に示す.SUS304については,光 学顕微鏡組織で認められたマルテンサイト相の増加 とともに,図10に示すようにくり返し歪み付与に 伴い,転位組織の変化,すなわち,転位密度の増加 およびセル化の進行が明らかである.転位組織のセ ル化は変形抵抗の低下,すなわち加工軟化をもたら す.しかし,図4に示したように,SUS304はくり 返し歪み付与に伴い加工硬化している.その理由と しては,転位組織のセル化に伴う軟化よりも,マル テンサイト相の増大効果が上回ったため,加工硬化 挙動を示したものと考えられる.

SUS316では、図11に示すように無負荷および 引張負荷の組織と比較して、くり返し歪み付与5サ イクルで転位密度がやや増大している.また、くり 返し回数50サイクルでは、転位密度の増加ととも にセル化が進行している.転位密度の増加は、初期 のくり返しでの加工硬化を、また転位組織のセル化 は30サイクル程度以降での変形抵抗の安定化をも たらしたものと考えられる. SS400 の転位組織の変化は,SUS316 に類似して いるが,転位のセル化がさらに明瞭に進行するとと もに,50 サイクルでは転位セルサイズが大きくなっ ている.セルサイズの粗大化は,変形抵抗の低下を もたらす.このために,SS400 では,くり返し歪み 付与による僅かな軟化が認められ,また硬さの増加 も顕著ではなかったものと考えられる.くり返しひ ずみ付与による転位組織のセル化,セルサイズの粗 大化,またそれらの組織変化による軟化現象につい ては,従来知見<sup>(3)~(6)</sup>に一致する現象である.

また単純引張と繰り返しひずみ付与では塑性ひず み量の直接比較はできないが、両者の組織を比較す ると、くり返しひずみ付与試験材では転位組織のセ ル化とともにくり返しひずみ回数の増加に伴いセル サイズが大きくなっていることが分かる. くり返し 歪み付与試験では1回の変形量が小さいことから、 長範囲の変形組織が発達しにくいため、転位のセル 化およびセルサイズの増大を促進すると推察され る. そのため、図10~12に示したように、くり返 しひずみ付与回数が増えても、SUS304 および316 では加工硬化がさほど進行せず、また SS400 では 逆に軟化したものと考えられる.



図10 SUS304のくり返し歪み付与試験時の組織変化(透過電子顕微鏡観察)



図 12 SS400 のくり返し歪み付与試験時の組織変化(透過電子顕微鏡観察)

# 3.2 長時間熱時効による材料の硬度, 組織変化に関する実験結果

各材料の熱時効による硬度および組織変化を前節 と同じ方法で測定,観察した.

#### 3.2.1 長時間熱時効による材料の硬度変化挙動

各鋼種の時効による硬さ変化の挙動を図 13 ~ 15 に示す.

図 13 に示すように SUS304 の予歪み無し材では, 長時間時効による硬さ変化はほとんど認められな かった.しかし,予歪み 3% 材では,1000 時間時 効で硬さが増加し,3600時間時効では逆に硬さが 低下した.予歪み10%材では長時間時効に伴い, 硬さは低下した.

図 14 に示すように SUS316 の予歪み無し材では, 1000 時間時効までは大きな硬さ変化は認められな かったが,3600 時間の長時間時効により僅かに硬 さが低下した.また,予歪み 3% および 10% 材では, いずれも長時間時効に伴い,硬さは低下した.

図 15 に示すように SS400 の予歪み無し材では, 3600 時間の長時間時効で硬さが低下した.予歪み 3% 材では,時効に伴い硬さが上昇した.また,予歪み 10% 材では 360 時間および 1000 時間時効で僅かに硬 さが上昇したが,3600 時間の長時間時効では硬さは



硬度変化

SUS316の長時間時効による 硬度変化

図15 SS400の長時間時効による硬 度変化

低下した.

## 3.2.2 長時間時効による材料の組織変化挙動 (光学顕微鏡観察)

360時間,3600時間の長時間時効熱処理材の光学 顕微鏡組織を、無時効材と比較して、図16~18に 示す. これから明らかなように、いずれの材料も 予歪みの有無にかかわらず、光学顕微鏡では明瞭な 組織変化は観察できなかった.

各鋼種の長時間時効の代表例として, 250℃ で



図 16 SUS304 の長時間時効による組織変化(光学顕微鏡観察)



図17 SUS316の長時間時効による組織変化(光学顕微鏡観察)



図18 SS400の長時間時効による組織変化(光学顕微鏡観察)

## 3.2.3 長時間時効による材料の組織変化挙動 (透過電子顕微鏡観察)

各鋼種の長時間時効の代表例として,250℃ で 360 時間,3600 時間の長時間時効熱処理材の透過 電子顕微鏡組織を,無時効材と比較して,図19~ 21 に示す. 図 19 に示す様に SUS304 の予歪み付与材では, 3600 時間の長時間時効により転位密度が低下して いるように見え, 歪みを受けたマルテンサイト相の 回復を示唆していると思われる. この転位組織の変 化, すなわち組織の回復のために, 長時間時効によ り硬さが低下したものと推察される.



図 19 SUS304 の長時間時効による組織変化(透過電子顕微鏡観察)



図 20 SUS316 の長時間時効による組織変化(透過電子顕微鏡観察)



図 21 SS400の長時間時効による組織変化(透過電子顕微鏡観察)

図 20 に示すように SUS316 では 3600 時間の長時 間時効により,転位密度が減少しているように見え る.またセル化していた転位組織の解消傾向も一部 に認められる.これらの転位組織の変化,すなわち オーステナイト相の回復のために,長時間時効によ り硬さが低下したものと推察される.

図 21 に示すように SS400 の予歪み無しの長時間 時効による下部組織の変化は明瞭ではない.予歪み 3% 材も,時効による組織変化は明瞭ではない.し かし,硬さが増加していることから,転位の固着が 進行しているものと推察される.

## 原子力発電所鋼構造物の健全性を硬さ で評価する手法に関する考察

前報<sup>(2)</sup>および本調査により,原子力発電所の代表 的な構造材料について,地震動による歪みおよび熱 時効により硬さが変化することを定量的に明らかに した. また, それらの現象が冶金学的な組織変化に 裏付けられることも示した. したがって, 原子力発 電所鋼構造物の健全性を硬さで評価する本手法が, 原理的に有効であることを立証できた. また, 上記 の硬さ変化の現象は複雑であり,各鋼材の初期条件, 温度履歴, 歪み履歴などの定量的データの整備が, 本手法の精度向上にとって重要であると言える.

#### 5. まとめ

地震被災後の健全性評価手法として硬度測定法の 実用化を図るために実際の地震を想定して,塑性歪 みの繰り返し負荷と硬さ,組織の関係,さらに長時 間熱時効による SUS304, SUS316 および SS400 の材 質変化について調査し以下の結論を得た.

(1)繰り返し歪み付与試験時の鋼材の硬さおよび組織 変化を明らかにした. SUS304 および SUS316 では 繰り返しの初期に最大応力の増加すなわち加工硬化 を示し、その後は僅かな加工硬化または飽和挙動を 示した.一方、SS400 では、繰り返し初期に加工硬 化を示した後に、その後は加工軟化した.これらの 応力および硬さ変化は、主として転位組織の形態変 化に起因すると推察され、従来の冶金学的知見に合 致するものであった.

(2)1000時間および3600時間の長時間熱時効を受けると,鋼種または予歪み条件によっては,硬さ,組織に変化が認められた.これらの硬さ変化は,光学顕微鏡および透過電子顕微鏡観察による組織変化とほぼ対応していることも明らかとなった.

(3)前報および本調査により,原子力発電所鋼構造物 の健全性を硬さで評価する本手法が,原理的に有効 であることを示した.また,上記の硬さ変化の現象 は複雑であり,各鋼材の初期条件,温度履歴,歪み 履歴などの定量的データの整備が,本手法の精度向 上にとって重要であると言える.

# 文献

- (1)原子力安全保安院: 柏崎刈羽原子力発電所の 設備健全性について, 平成21年3月
- (2) 戸塚ら: INSS JOURNAL, Vol.17, p 200, (2010)
- (3) 高村仁一:日本金属学会報, Vol. 25 (1986) p 379
- (4) Nakai et al.: Int. J. Fatigue, 19-Supp. 1 (1997) S223
- (5) 松岡ら:日本金属学会誌, vol. 70, No. 8 (2006)p. 700-708
- (6)西田ら:日本機械学会材料力学部門講演会講 演論文集,No. 98-5 (1998) p. 21-22