

地震後の原子炉構造部材の健全性評価法 (硬度測定による塑性ひずみ検出法) について

Integrity Assessment Method for Structural Materials of
Nuclear Reactor after Suffering an Earthquake

- An Evaluation Method for Plastic Deformation by Measuring Hardness of the materials -

戸塚 信夫 (Nobuo Totuka) *1

要約 地震被災後の原子炉構造部材の非破壊的健全性評価手法として部材の塑性ひずみをポータブル硬度計による硬度測定により評価する方法が最も有効な方法のひとつと考えられているが、実構造材に適用する具体的手法について必ずしも十分理解されていない。そこで本稿では原子力安全システム研究所 (INSS) で行った検討をまとめ具体的測定法、注意点等について概説する。

キーワード 原子炉構造材, 硬度測定, 塑性変形, ポータブル硬度計

Abstract Hardness measurement is one of the most effective methods for non-destructive integrity assessment evaluating plastic strain of structural materials of nuclear power plants after suffering an earthquake. However, the actual evaluation method using a portable hardness tester has not been understood commonly yet. In this article, our study on this method has been summarized and a practical procedure using a portable hardness tester applicable to actual plants has been reported.

Keywords Structural Material of Nuclear Reactor, Plastic Deformation, Portable Hardness Tester

1. はじめに

2007年7月に発生した中越沖地震以来、原子力発電所が想定を上回る大きな地震動を受ける事例が発生し、原子力発電所の耐震性が懸念される事態となっている⁽¹⁾。東京電力柏崎刈羽原子力発電所の主要機器において大きな損傷は見られていないが⁽¹⁾、このことをより定量的に実証するには最も大きな負荷がかかった部位の塑性変形量を評価することが有効である⁽²⁾。原子炉の主要構成材料である金属材料は塑性変形により材料硬度が変化するため材料の硬度変化を測定し、塑性変形量を評価する方法が材料の健全性評価に最も有効な手法と考えられ研究も行われている^{(2)~(4)}。しかしながら実機において具体的に測定する方法が十分理解されているとは言い難いのが現状である。そこで本稿では原子力安全システム研究所 (INSS) で行った検討結果^{(3),(4)}をまとめて具体的測定方法について述べる。なお当該評価

法は目視および探傷試験により損傷が発見されない部位の健全性を更に検証するための追加検証であることは言うまでもない。

2. ポータブル硬度計について

実機の硬度を測定するにはポータブル硬度計による測定が必須であるが、ポータブル硬度計は測定者が硬度計を手で支えて測定するため、据え置き式の硬度計と比較してどうしても測定者による差異やバラツキが大きくなる欠点がある。そこでこれらのバラツキを抑制する方法についての検討が必要である。なおポータブル硬度計としては直読式ポータブルビッカース硬度計、超音波振動式硬度計、反発式硬度計の3種類が一般に使用されている。直読式はビッカース硬度計と同様のダイヤモンド圧子をバネ式荷重で被測定部材に押し付け、圧痕の大きさを内蔵したCCDカメラで直接観察して測定するもので

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

あり、超音波振動式は圧子の押し込み深さを、圧子を先端に装着した振動子に与えた超音波振動数の変化として間接的に読み取るものである。反発式硬度計はエコーチップ(圧子を先端に取り付けた反発子)をバネで被測定材に打ち付け、打撃速度と反発速度の差を測定して材料に吸収されたエネルギーから硬度を評価するものである。以下では装置がコンパクトで操作性に優れたものの、ややバラツキが大きくなり易い超音波振動式を用いて行った具体的測定法の検討について述べる。

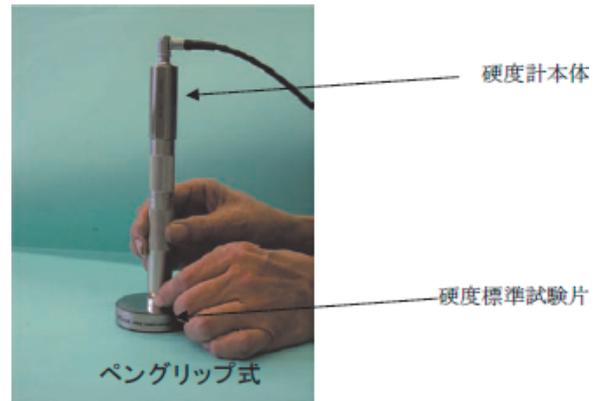


図1 ポータブル硬度計外観⁽³⁾

3. ポータブル硬度計による 硬度測定法の検討

用いた超音波振動式硬度計(JFEアドバンテック社製, SH22)の外観を図1に示す。本検討においては、据え置き式のビッカース硬度計と同等の測定精度を得ることができる手法について検討した⁽³⁾。

まずポータブル硬度計の測定者によるバラツキを調べた。図2に異なる4人によるポータブル硬度計を使った測定値のヒストグラムを示す。図の最上段に据え置き式でのヒストグラムを示した。測定サンプルはビッカース硬度計の標準硬度試験片(HV200)であり、それぞれ40点ずつ測定した。

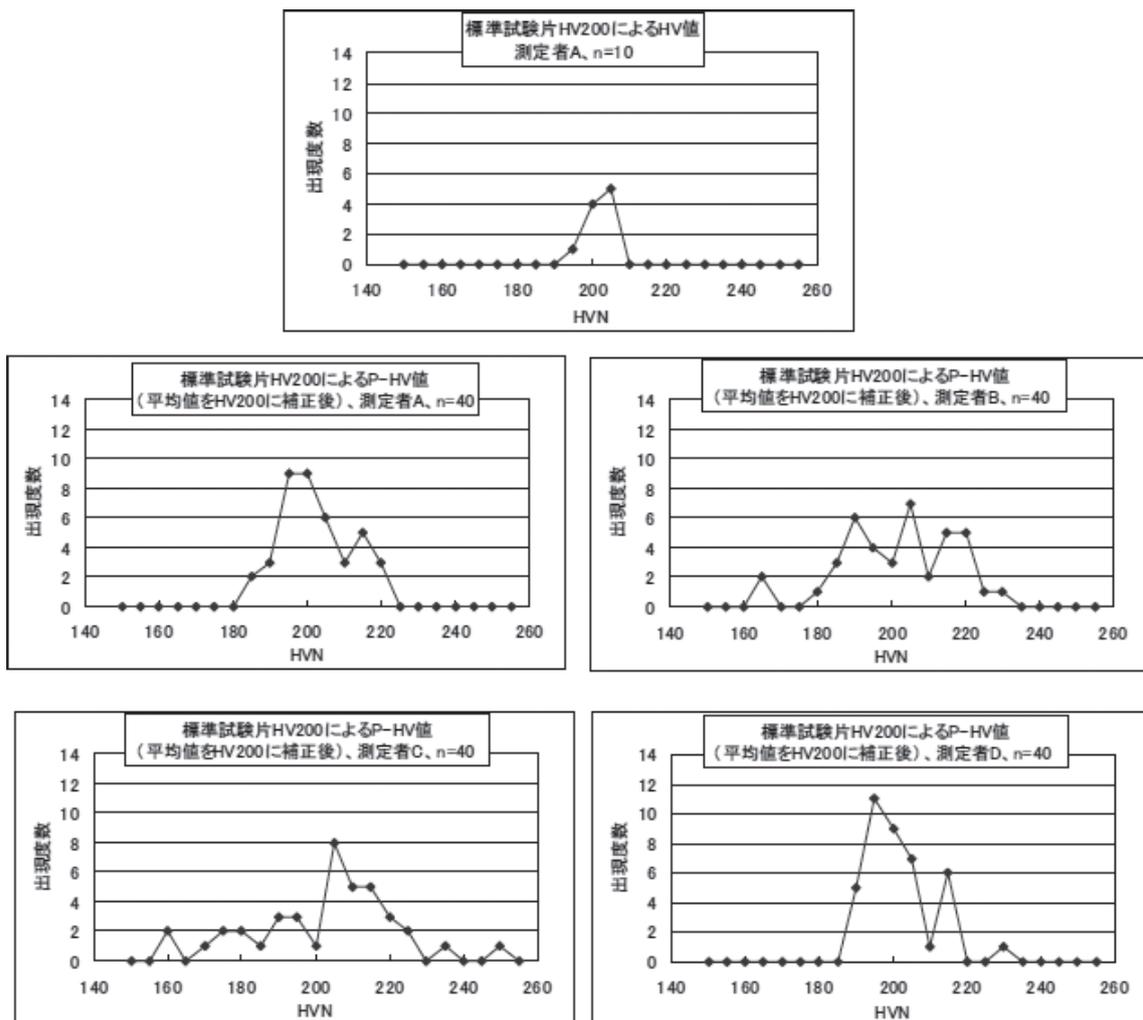


図2 測定者によるポータブル硬度計の測定値のバラツキ⁽³⁾

図2に示すように、測定者AおよびDの測定値は比較的良好な分布状態であるのに対して、Cの測定値はバラツキが大きく明らかに測定者による個人差がある。大きなバラツキの原因は硬度計の押し付け方が安定していないためと考えられる。これは熟練により改善されると考えられるがある程度の測定不良値が混入する恐れがある。そこで不適切なデー

タを削除する方法を検討した。図3に測定者Aの測定結果から上下限の一定のデータを削除して解析した場合の平均値および標準偏差の計算結果を示す。母数としては、全測定数 $n = 40$ および、この中から任意に抽出した $n = 30, 20, 10$ のケースについて検討した。図中の左端のデータは通常のビッカース硬度計による測定値である。いずれの場合も上下

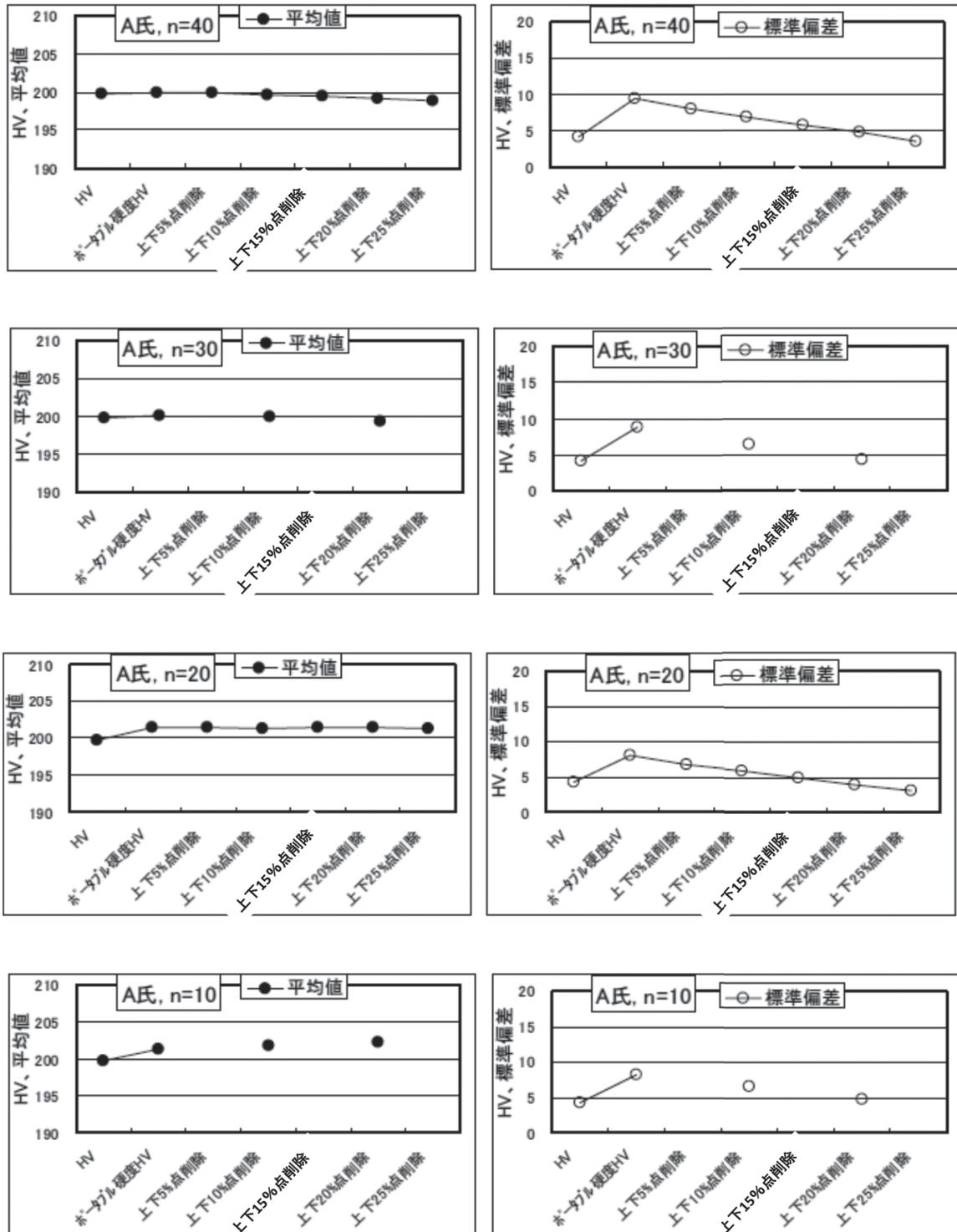


図3 硬度測定値のデータ処理方法による平均値、標準偏差の差異 (測定者A : $n = 40, 30, 20, 10$)⁽³⁾

の削除データ点数を増やした場合、平均値には大きな変化は見られないが、標準偏差は小さくなり、全測定データの上下それぞれ15%を除外することによりほぼ通常のビッカース硬度計に近い標準偏差となる。なお削除データ点数を20%以上とすると通常のビッカース硬度計の値と平均値の差異がやや大きくなる傾向が見られた。以上のことから、上下15%のデータを除外すれば、平均値を大きく変えることなく、異常なデータを排除し、バラツキ低減できると考えられる。なお測定数nは10で通常のビッカース硬度計の値と平均値の差異がやや大きくなることと作業性を考慮して20以上とした。また測定者BおよびCのバラツキは大きく十分な測定技能を有していないと考えられるので、このような作業者を排除または技能の向上を促すために、標準サンプルによる測定値の標準偏差がある基準値（例えば12）を超える場合は測定者とししない等の対策が必要である。

以上の検討からポータブル硬度計による実機測定法として以下を設定した。

- ・一か所20点以上測定し、上下15%ずつのデータを除外し、中央の70%を測定値とする。
- ・測定者は標準試験片での測定値の標準偏差が12を超えない測定技能を有する者とする。

なお「中越沖地震後の原子炉機器の健全性委員会」が直読式のポータブルビッカース硬度計を用いて測定回数によるバラツキの変化を検討した結果では図4に示すように20回以上の測定で標準偏差は12以

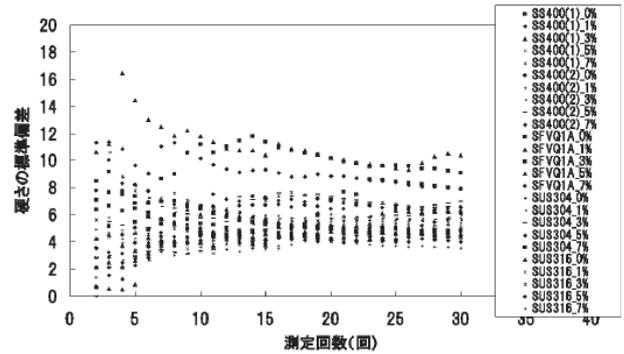


図4 硬さ測定値の標準偏差と測定回数の関係（直読式ポータブルビッカース硬度計）⁽⁵⁾

下に安定しており20回以上の測定を推奨している⁽⁵⁾ことからポータブル硬度計による硬度測定では20回以上の測定と、前記のような測定者の技能評価を標準試験片での測定値の標準偏差で行うことは有効と考える。

次に被測定物の表面研磨の影響について述べる。一般に硬度測定は表面の凹凸による硬度計圧子の圧痕のゆがみや表面傷や機械加工による表面加工層の影響を受けるため、表面が平滑でかつ表面加工層が除去されていることが望ましく、ポータブル硬度計は通常のビッカース硬度計よりも測定値がバラツキ易いため、バフ研磨までの5段階の研磨仕上げ状態での測定値の差異について調査した。試料は市販の炭素鋼（SS400）およびオーステナイトステンレス鋼（SUS304）を用い、測定は前述の方法に準拠した。図5に測定結果を示すが、SS400では耐水研磨紙800番でも標準偏差がバフ研磨に比較して大きく

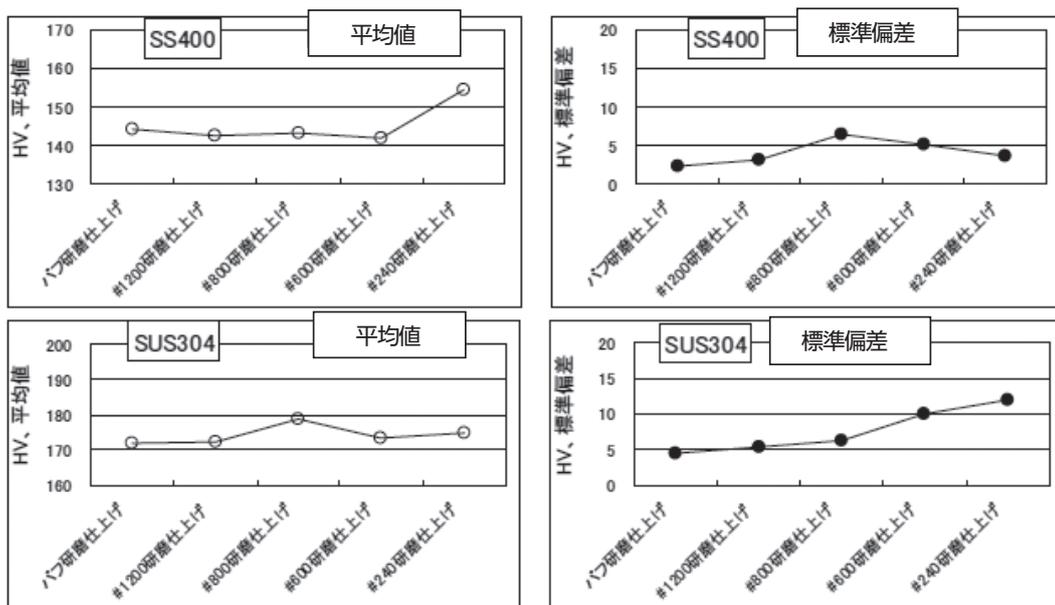


図5 ポータブル硬度計の測定値（平均値、標準偏差）に及ぼす表面研磨仕上げの影響⁽³⁾

なる傾向を示し、240番研磨では硬度が高くなり、表面加工層の影響が残っているものと考えられる。SUS304では硬度の差異は大きくないものの600番以下の研磨では標準偏差が大きくなる傾向が認められる。以上の結果から、ポータブル硬度計での測定では1200番程度以上の表面研磨が望ましいと考えられる。

4. 硬度測定による塑性ひずみ検出の検討

市販の炭素鋼（SS400）およびオーステナイトステンレス鋼（SUS304）からJIS Z 2201 13B号試験片を切り出し、0.8,1.5,3.0,6.0,10.0,20.0%の引張りひずみを付与した試験片を作製し、試験片平行部の硬度を通常のビッカース硬度計およびポータブル硬度計で測定した⁽³⁾。なお前記ひずみ量は引張り試験機のクロスヘッド変位値で制御したため、弾性ひずみを含み実質的な塑性ひずみ量はこれらの値から約0.3%を引いた値となる。またポータブル硬度計の測定方法は前述の方法に準拠した。

図6および7にSS400と SUS304の結果をそれぞれ示す。これからわかるように、ビッカース硬度計、ポータブル硬度計ともにひずみ量の増加とともに硬度が上昇している。また1%以下の微小ひずみの検出は困難であるが、3%以上のひずみが加われば硬度は10以上上昇しており、測定誤差（標準偏差5程度）を考慮しても検出可能と考えられる。なお大きな地震動を想定して一定のひずみを疲労試験機で付与する繰り返しひずみ付加試験⁽⁴⁾においても3%のひずみ付加試験では繰り返しにより単純引張りひずみ付与材よりも硬度上昇が大きくなるため、地震

動により3%以上の塑性変形が加わった後、繰り返し変形により見かけ上元の形状に戻ったとしても硬度測定では塑性変形の検出は容易になると考えられる。以上から原子炉構造材料として多用されている炭素鋼およびオーステナイトステンレス鋼の地震被災後の材料健全性を硬度で評価する方法では3%以上の塑性変形を受けているかどうかを判別できると考えられる。

5. 運転中の熱時効による硬度変化の検討

次に被災前の材料硬度が、使用環境条件によっては時効により変化する可能性もあるため、オーステナイトステンレス鋼と炭素鋼の時効による硬度変化を検討した⁽⁴⁾。図8～10に示すように350℃以下の3600時間までの時効による硬度変化挙動は複雑であり、単調な硬化、あるいは軟化を示していない。これは時効による転位の固着（硬化）と回復（軟化）が競合することによるものと考えられるが材料によっては更に第2相の析出・成長・粗大化による変化が加わり、より複雑になることが考えられる。しかしながら日本のプラントの多くは20年以上の運転経験のあるものであり、前記の時効挙動が基本的に材料中の種々の原子の拡散に支配されると考えられることから長時間側での変化は指数関数的に小さくなる可能性が高く、20年以上の運転後更に時効により大きく硬度が変化することは考え難いため、これから被災前の硬度測定を実施すれば時効による硬度変化は十分小さいことが期待できる。なお20年以上の長時間時効による材料硬度変化の確認は今後20年以上運転後に廃炉となる実機材料の調査を

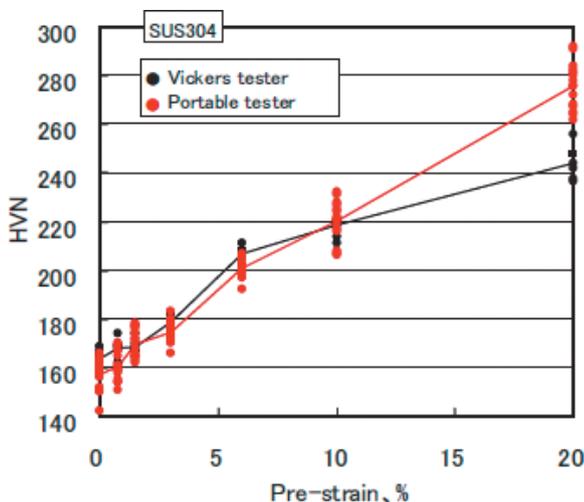


図6 SS400の歪量と硬度の関係⁽³⁾

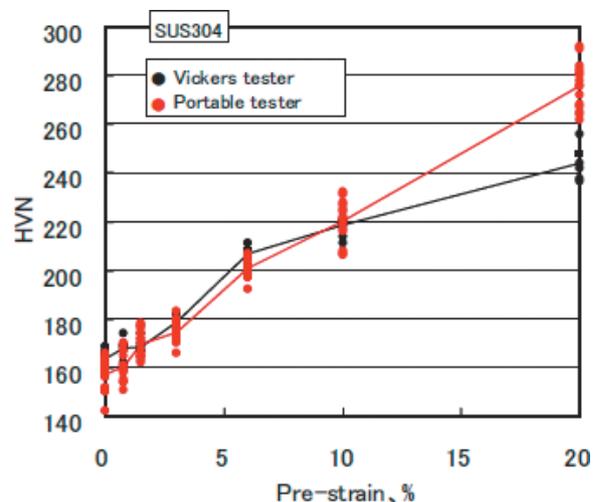


図7 SUS304の歪量と硬度の関係⁽³⁾

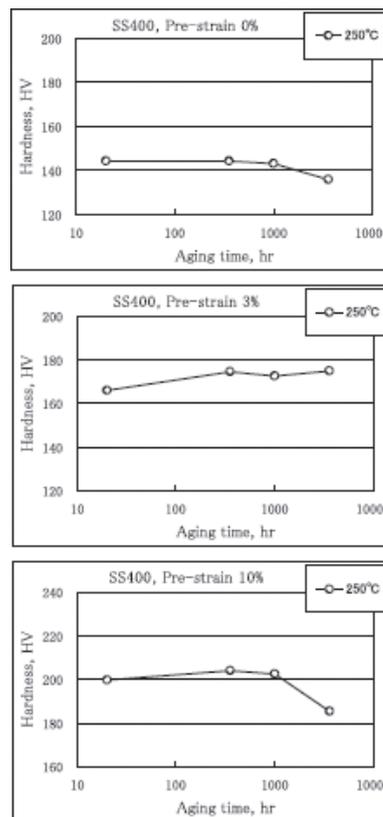
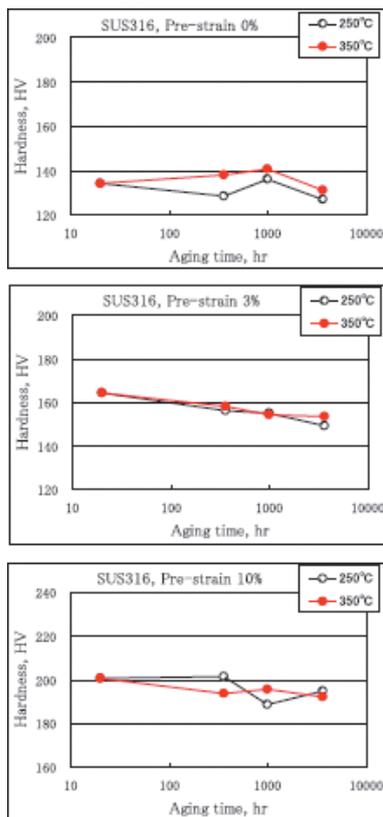
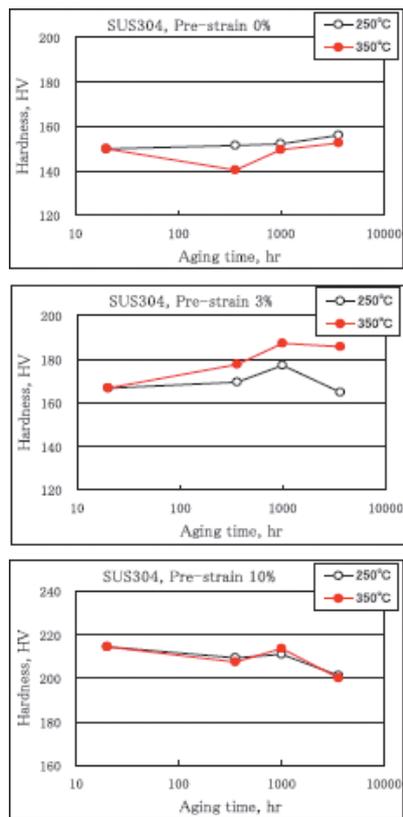


図8 SUS304の時効による硬度変化⁽⁴⁾

図9 SUS316の時効による硬度変化⁽⁴⁾

図10 SS400の時効による硬度変化⁽⁴⁾

行うことで明らかにすることが可能であり今後の課題として取り組むことが考えられる。その際、同一材料の直管部、エルボー部、低温部、高温部等の硬度を測定することで長時間時効に及ぼす加工や温度の影響が明らかにできると考えられる。また必要ならば追加時効して更に長時間の時効の検討も可能である。

6. 硬度測定による 塑性ひずみ検出法の整理

以上超音波振動式のポータブル硬度計による硬度測定法について具体的に述べたが、2で述べたように他の硬度計よりややバラツキ易い傾向があるため、本稿で述べたデータ処理法、表面処理法、測定者の管理は必要である。なお地震被災後の塑性変形量を評価するためには被災前の材料硬度の評価が必要であるが、これについては「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会」で検討が行われ、評価対象部位と同一ロットの同一材料で地震動による影響が小さいと評価される部位の硬度で評価可能であるとされている^{(2),(5)}。また当該委員会ではポータブル硬度計3種のいずれでも塑性ひずみの検出が可能

であるが、据え置き式の硬度値に近い値を示す直立式の硬度計で40点の測定を推奨している。しかしながら通常の鉄鋼製品では同一ロットの同一材料でも試験片の採取位置によってビッカース硬度10程度のバラツキを生じることはあるため、より正確な評価を行うためには地震被災前に地震によって最も負荷が加わると想定される代表的部位について予め硬度測定しておき、万一大きな地震に見舞われた時は前回硬度測定位置にできるだけ近接した位置でかつ前回の圧痕の影響を受けない位置（例えば前回の圧痕から圧痕の対角線長さの5倍程度離れた位置（約2mm程度））の硬度を測定することでより正確なひずみ測定、材料の健全性評価が可能になるものとする。なお硬度測定によるひずみ量の評価は硬度の絶対値を評価するものではなく、変化量を評価するものであるため2で述べたいずれのタイプのポータブル硬度計でも使用可能であるが、被災前と後で同一の硬度計を使用する必要がある。以上ポータブル硬度計による硬度測定法についてまとめると以下ようになる。

- ・ポータブル硬度計は通常の硬度計に比較してバラツキ易いため以下のような対策が必要である。
測定者の選定：標準硬度サンプルの測定値の標準

偏差が一定値（例えば20点測定で12）以下の者を測定者とする。

測定部位の研磨：耐水研磨紙1200番以上の研磨が望ましい。

測定回数およびデータ整理：一か所20点以上測定し、測定点のうち上下各15%の測定値を削除し、中央70%の測定値を採用する。

- ・当該硬度測定法では3%以上の塑性ひずみが検出可能と考えられるので、地震動によって部材の健全性に影響する局所的塑性ひずみが加わったかどうかを判定できると考えられる。

7. まとめと留意点

地震被災後のひずみ評価をより正確に行うためには、地震動によって最も大きな荷重が加わる可能性の高い代表的部位を適切に選定し、事前に硬度測定することが重要である。このとき、事前の硬度測定時から地震被災までの材料の時効による硬度変化が、どの程度かを評価する必要がある。これには前述したように、20年以上運転して廃炉となる複数の実機材の同一材料の直管部、エルボー部、低温部、高温部の硬度を測定することにより、長時間時効に及ぼす加工や温度の影響を明らかにすることが、地震被災前の硬度測定を実施した後、地震被災までの時効による硬度変化を評価する一助となると考えられる。なお必要があれば当該材料を廃炉プラントから切り出して、追加時効すればさらに長時間の時効効果の評価が可能となる。

また、測定部位によっては作業姿勢等の制約からデータがよりバラツキ易くなる可能性もあるため、実機に即した作業者の訓練を行う必要がある。

以上ひずみ測定の見地については以下のようにまとめられる。

- ・地震被災前に測定された代表部位が、必ずしも地震被災後の実地震動による最高負荷部とは限らないものの、被災前の測定値は参照値として有効活用できることを認識する必要がある。
- ・バラツキを小さくするための測定者の訓練が必要であり、これには廃炉が決定している実機の活用が有効と考えられる。

参考文献

- (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) 日本原子力技術協会, 中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会, “中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価, 平成22～23年度報告”平成24年3月.
- (3) 戸塚信夫, 松崎明博, “原子炉構造材の非破壊的評価手法の検討(その1)” INSS JOURNAL, Vol.17 (2010), pp200-213.
- (4) 戸塚信夫, 松崎明博, “原子炉構造材の非破壊的評価手法の検討(その2)” INSS JOURNAL, Vol.18 (2011), pp170-180.
- (5) 日本原子力技術協会, “地震後の機器健全性評価ガイドライン〔検査手法-配管・基礎ボルト等〕”平成24年3月.