

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	軽水炉配管の超音波探傷試験技術者の検査能力とその評価方法
Title(English)	Inspection capability of ultrasonic testing examination engineer and its evaluation process for the light water reactor piping
著者(和文)	東海林一
Author(English)	Hajime Shohji
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10780号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:水谷 義弘,轟 章,井上 裕嗣,阪口 基己,廣瀬 壮一,高木 敏行
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10780号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

軽水炉配管の超音波探傷試験技術者の 検査能力とその評価方法

東海林 一

目次

第1章 緒論.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 検査能力の指標.....	5
1.3 軽水炉における検査能力の目安.....	9
1.4 研究の目的.....	12
1.5 本論文の構成.....	12
1章 参考文献.....	15
第2章 検査能力の評価に用いる装置の開発.....	19
2.1 緒論.....	19
2.2 装置の仕様.....	20
2.3 バーチャル UT システムの開発.....	22
2.4 システムの検証.....	27
2.5 結 言.....	27
2章 参考文献.....	29
第3章 熟練者の検査能力.....	31
3.1 緒 言.....	31
3.2 試験技術者の練度による能力の違い.....	32
3.2.1 模擬探傷の実施.....	32
3.2.2 模擬探傷結果.....	36
3.2.3 練度による探傷作業の特徴.....	37
3.2.4 熟練の試験技術者の検査能力.....	44
3.3 実機における試験技術者の検査能力.....	45
3.3.1 実機探傷事例の調査.....	45
3.3.2 欠陥深さに応じた検出性推定.....	46
3.3.3 欠陥信号の検出性についての検討.....	49
3.3.4 欠陥検出率の定量的評価に関する検討.....	55
3.3.5 実機で期待される欠陥検出性.....	58
3.3.6 熟練者が実施した場合の検出性.....	59
3.4 結 言.....	59
3章 参考文献.....	61
第4章 配管の健全性維持に必要な欠陥検出性能.....	63
4.1 緒 言.....	63
4.2 配管の損傷確率と検査能力.....	64

4. 2. 1	想定する損傷の発生と進展	64
4. 2. 2	欠陥検出確率の設定	65
4. 2. 3	亀裂進展評価	66
4. 2. 4	供用期間中検査の実施手順	69
4. 2. 5	損傷の可能性評価	71
4. 2. 6	検査能力に応じたプラントの損傷確率	71
4. 3	試験技術者の練度に応じたプラントの損傷確率	74
4. 4	結 言	76
4 章	参考文献	78
第 5 章	試験技術者の訓練方法と認定基準	79
5. 1	緒 言	79
5. 2	試験技術者の訓練のあり方	80
5. 3	試験技術者の訓練成果確認基準	82
5. 3. 1	確認基準の考え方	82
5. 3. 2	成果確認に必要な検証データ数	88
5. 3. 3	試験技術者の訓練成果確認基準案	93
5. 3. 4	模擬試験における試験技術者の合否	95
5. 3. 5	合格した試験技術者が実施した場合のプラント損傷確率の評価	96
5. 4	結 言	99
5 章	参考文献	100
第 6 章	結 論	101
	謝辞	105

第1章 緒論

1. 1 背景

世界のエネルギー需要は、人口の増加、文化レベルの向上に伴って増加の一途をたどっている⁽¹⁻¹⁾。特に電力需要については、発展途上国における電化製品の拡大による需要拡大、先進国における自動車を代表とする移動機器の電化の流れもあり、エネルギー供給の主幹となり続けるものと予想される。

日本国内においては、人口の減少、節電意識の定着などによる電力需要の伸びが鈍化している⁽¹⁻²⁾。一次エネルギー供給源としては、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの活用が進められているが、安定供給や電源系統運用の面での懸念がある。火力発電の場合には温暖化ガスの問題や、国外からの調達に頼ることによる国際情勢の影響の懸念がある。大規模水力発電は立地の問題もあり拡大は見込まれない。原子力発電については、福島第一原子力発電所の事故を受けた否定的な世論は依然として強いものの、ベースロード電源としての原子力発電への期待は根強く、大きな役割を果たしていくものとされている⁽¹⁻³⁾。世界においても、ドイツなどが脱原子力の方針を打ち出しているが、2015年時点で世界で400基以上のプラントが運転中で、特に中国では原子力発電所の建設が相次いでいること、アラブ首長国連邦(UAE)などの産油国でも原子力発電を導入し始めるなどの動きもあり、世界的には原子力発電に対する一次エネルギー源としての期待は大きい⁽¹⁻⁴⁾。

原子力発電の主流となっているのが、中性子の減速材および冷却材として軽水を用いた軽水型原子力発電所であり、大きく沸騰水型炉(Boiling Water Reactor: BWR)と、加圧水型炉(Pressurized Water Reactor: PWR)に区分される。日本国内では商業用発電炉は全て軽水炉である。これらのプラントでは、供用開始後も定期的に運転を停止し、重要機器については点検を実施し、健全性を確認している。容器や配管といった耐圧バウンダリを構成する機器については、供用期間中検査(Inservice Inspection: ISI)として、主に非破壊検査(Non-destructive Examination: NDE)による健全性確認が行われている⁽¹⁻⁵⁾。

NDEによる健全性確認では、目視試験(Visual Examination: VT)や浸透探傷試験(Liquid Penetrant Test: PT)による欠陥検出や、超音波探傷試験(Ultrasonic Testing: UT)による欠陥検出および欠陥の寸法測定が行われている⁽¹⁻⁶⁾。UTに限らず、NDEの結果は、試験を実施する試験技術者の能力に依存するため、日本非破壊検査協会などが実施している技量認定試験⁽¹⁻⁷⁾によって、一定の技量のある者が試験を実施することが求められている。実際のプラントの点検においては、被ばく量低減や検査結果の信頼性向上を目的として、容器や配管の一部に自動探傷装置が導入されている。これによって試験技術者の技量の影響を最小化すると共に、探傷波形を全て記録することによる記録性向上、多数の試験技術者による確認を可能とし、信頼性を向上させている⁽¹⁻⁶⁾。さらには、フェーズドアレイ技術の導入など技術的な改良によって信頼性を向上させる試みも進められている。一方で、配管溶接部については、狭隘部であることや、エルボやティーなど複雑な形状の部位が対象となることもあり、自動探傷装置や新技術の適用率は未だに高くない。このため配管溶接部のUTは試

験技術者が、探触子を直接走査し、エコーを記録、判定する手動探傷による探傷が多くを占めている。

手動探傷による UT は特に試験技術者の影響を受ける手法でもある。プラント供用後の検査では、図 1.1-1 に示すような主に機器の内面側から発生する亀裂状の開口欠陥の検出と長さ (Length)、板厚方向の寸法である深さ寸法 (Depth) の測定を行うものである。UT による亀裂の深さ測定など特に高い精度が求められる検査では、技量実証制度 (Performance Demonstration : PD 制度) という試験技術者、試験手順書、試験装置を一体とした認証制度が運用されている⁽¹⁻⁸⁾。米国では、米国機械学会 (ASME) 規格に従って⁽¹⁻⁹⁾、電力研究所 (Electric Power Research Institute : EPRI) が、PDI (Performance Demonstration Initiative) プログラムとして、PD 試験の実施および運用を担っている。さらに欧州においても、European Network for Inspection and Qualification (ENIQ) ^(1-10~18) という指針に従った実証制度が運用されている。これらの PD 制度あるいは類似の実証試験制度の適用状況を、表 1.1-1 に示す⁽¹⁻¹⁹⁾。ISI における対象部位、欠陥の検出と長さ測定および深さ測定の各々について、主な手法 (自動/手動) を示し、各国の実証試験制度の適用状況を示した。

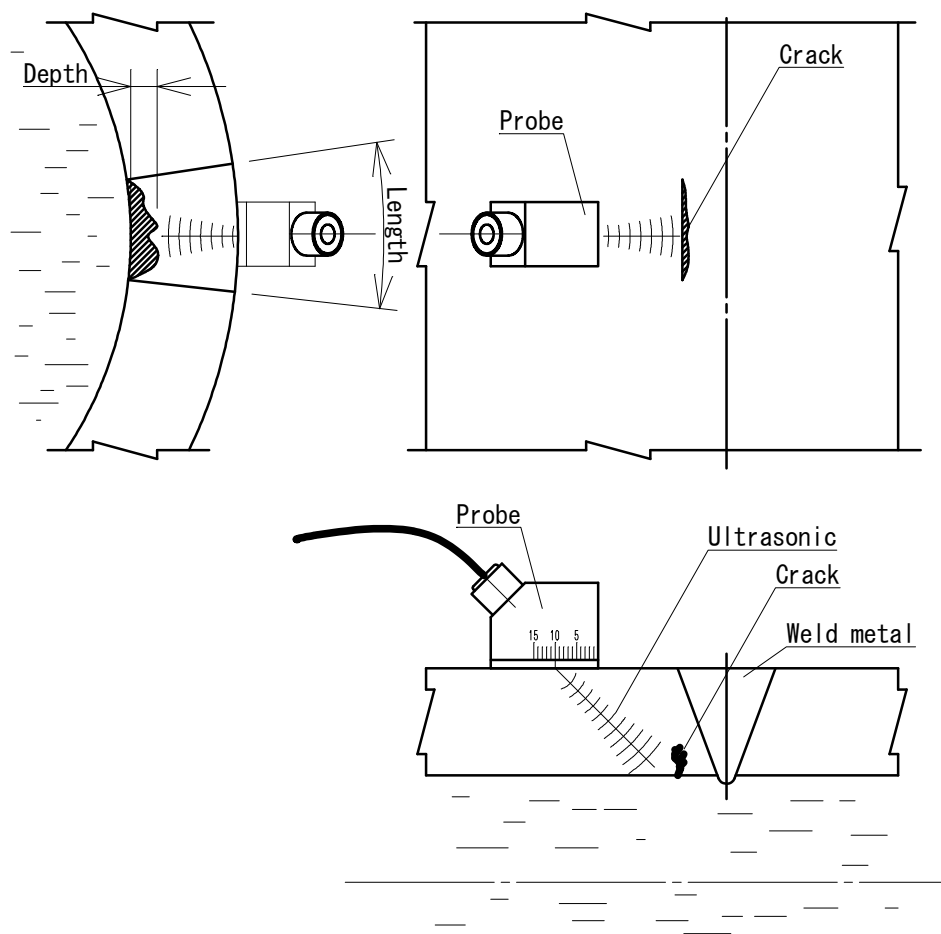


Figure 1.1-1 Conceptual drawing of ultrasonic testing on in-service inspection.

Table 1.1-1 Overview of performance demonstration system application status.

		Major technique	Number of inspection	Japan	United State	Europe*1	South Korea	Chinese Taipei
Austenitic piping weld	Detection and Len. sizing	Manual/Automated	many	☆	○	○	○	○
	Depth Sizing	Manual	few	○	○	○	○	○
Ferritic piping weld	Detection and Len. sizing	Manual/Automated	many	☆	○	○	○	○
	Depth Sizing	Manual	few	—	○	○	○	○
Clad interface vessel	Detection and Len. sizing	Automated	many	—	○	○	(○)	(○)
	Depth Sizing	Automated	few	—	○	○	(○)	(○)
Nozzle inner radius	Detection and Len. sizing	Automated	many	—	○	○	(○)	(○)
	Depth Sizing	Automated	few	—	○	○	(○)	(○)
Vessel weld	Detection and Len. sizing	Automated	many	—	○	○	(○)	(○)
	Depth Sizing	Automated	few	—	○	○	(○)	(○)
Vessel top head penetration	Detection and Len. sizing	Automated	middle	—	○	○	○	(○)
	Depth Sizing	Automated	few	—	○	○	○	(○)
Bolts and Stud	Detection	Manual/Automated	many	—	○	○	○	○
Cast austenitic piping weld	Detection and Len. sizing	Automated	many	▲	▲	▲	▲	▲
	Depth Sizing	Manual	few	▲	▲	▲	▲	▲
Dissimilar metal weld	Detection and Len. sizing	Automated	many	☆	○	○	○	○
	Depth Sizing	Automated	few	(△)	○	○	○	○
Weld overlay (Repair)	Detection and Len. sizing	Manual	many	(△)	○	○	(○)	○
	Depth Sizing	Manual	few	(△)	○	○	(○)	○

○ : Applied

△ : Preparing

▲ : Under discussion

☆ : Preparing training program

(○):Applied(EPRI facility)

(△):Preparing(EPRI facility)

— : No plan

*1 : The demonstration is needed and difference program is applied in each country.

ここで示されるように、米国をはじめとした韓国、台湾など ASME 規格に従っている国では、ほぼ全ての検査対象部位について実証制度が適用されている。特に適用箇所が多く、多くの試験技術者を要するステンレス配管および炭素鋼配管溶接部、ボルト等については、日本よりもプラント数の少ない韓国や台湾でも、自国で実証試験を行う体制が整えられている。その他の部位については EPRI の PDI プログラムを使用して認証を受け、それを各国が認めることで実証制度が運用されている。米国 ASME に従って実施している実証制度は、実際に近い試験体および人工欠陥、一部で実機での損傷部位を切り出した試験体を用いて、実際に欠陥を検出あるいは寸法測定等が適切に行えることを示す試験である。予め、手順書や機材の技術的な審査も行われるが、そこでも試験体に付与された欠陥が適切に検査可能であることを確認することを主体としている。その上で、各試験技術者に対して試験を実施し、ASME 規格で定められた合格基準に従った判定を行い、欠陥が適切に検査されることをもって認証される。なお PDI 認証の資格に有効期間は記載されていないが、応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking) を対象とした認証については、3 年毎の再取得を求める運用がされている。米国の PDI 方式の長所は、実際の検査能力を示すことができるため説明性が良いこと、試験技術者も実際に近い欠陥を探傷する経験をすることができるため、自信を持った探傷ができることがある。近年では、目視点検などの UT 以外の手法へも拡大していく動きもある、一方で、多数の試験体を準備する必要があること、それらの試験体の秘匿性を保つ必要があること、手順書や機材等を変更した場合には、再度認証を取得する必要があることなどの短所もある。

欧州では、米国 ASME 方式の認証制度は運用されていないが、ENIQ RP (Recommended Practice) という指針に従って、各国が実証制度を定めている。これも原則として全ての部位について、欠陥の検出性に対する証明 (説明) を求めている。米国の PD 制度とは若干異なり、手順書や機材の有効性の確認に対する技術審査 (TJ: Technical Justification) が主体である。これは欠陥の検出あるいは寸法測定が適切に行えることを、文献や実証、シミュレーションなどを活用して技術的に説明するものである。その上で試験技術者の要求技量について、検査技術の難易度に応じて、基礎資格だけを求める場合や、簡単な訓練等の要求、実証試験などが課せられる場合などがある。この方式の場合には、試験体の数を削減することが可能で、技術的に最も難しいとされる試験体のみを準備することが多い。また技術的な証明をすることが目的であることから、手順に従った探傷を行った場合に、期待される信号が検出されることなどを示す、オープンテストが主体となり、試験体の秘匿性は必要がない。しかし、この方式の場合には、手順書を審査する側の技術レベルや中立性、客観性が必要であることや、手順書の開発に多大なコストがかかることなどの短所もある。

日本国内においては、亀裂深さ測定などの難易度の高い検査対象については、米国 ASME 方式に近い PD 制度が整備されている⁽¹⁻⁸⁾。2000 年頃に顕在化した低炭素ステンレス鋼の SCC 深さ測定で適切に計測できなかった例があったこと、欠陥を残したまま運転を継続する

維持規格の適用に対して欠陥深さの測定精度が重要であったこともあり、ステンレス鋼配管溶接部の亀裂深さ測定については 2005 年から PD 制度が運用されている。それ以降も配管の補修工法であるウェルドオーバーレイ (WOL: Weld overlay) 施工部、異種金属溶接継手部 (DMW: Dissimilar metal weld) の亀裂深さ測定など、特に難度の高い検査を優先して制度の準備が進められてきた。しかし欠陥の検出については、熟練した試験技術者が従事することで十分な検査能力があることが既往研究⁽¹⁻²⁰⁾で示されていたことから PD 制度導入の優先順位は低いとされてきた。しかし、昨今のプラント稼働状況から、ISI が定期的に行われる環境ではなくなり、プラントの稼働に伴って熟練した試験技術者が不足する可能性も懸念され、試験技術者の訓練制度なども検討されている^(1-21,22)。PD 制度は技量を確認することで、求められる技量に達していない者を除外することであるが、熟練した試験技術者が不足している現状の解決策としては、訓練による育成を主体とした制度が適切である。

検査能力の目標は、プラントの健全性を確認する上で、充分であることが必要である。検査対象となった溶接配管溶接部に損傷が発生した場合の、検査能力とその継手の破損確率の関係については先行研究があり^(1-23,24)、応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking) を想定した場合に、検査能力によって溶接継手の破損確率がどのような影響を受けるのかについて検討している。しかし一般の ISI の基本的な考え方は、損傷が発生や進展しないようにプラントは製造されているが、想定していない損傷がないことを確認するために、抜き取りで検査を行うというものである。すなわち、損傷が顕在化していない通常の ISI の運用では、通常は抜き取り検査で健全性を確認し、欠陥が検出された場合に、類似箇所の点検などの水平展開を行う運用を行い、プラント全体としての損傷を抑えることとしている。この通常の ISI を行う場合の検査能力とプラント全体としての損傷の可能性を明らかにする必要がある。

すなわち、ISI における配管系統の UT 検査を対象として、熟練の試験技術者の能力および熟練者ではない試験技術者の能力とはどのようなものであるのかを明らかにし、熟練した試験技術者が実施した検査がプラントの健全性を確保する上で充分であることを検証する。さらに熟練ではない試験技術者を訓練する要点を明らかにし、訓練実施後の達成度確認試験として適切な試験方法と評価方法を提案する。

1. 2 検査能力の指標

欠陥を検出する検査能力の指標の一つとして欠陥検出確率 (Probability of Detection: POD) がある。POD は、どの程度の確率で欠陥が検出可能であることを示すものである。ISI の UT における POD は、運転中に発生する疲労亀裂や SCC を対象としており、一般的には欠陥深さに対する値として示される。表面開口欠陥からの UT の信号 (エコー) の強度は、ある程度の大きさまでは、欠陥の面積に概ね比例して強くなり、それ以上の大きさでは一定の強度となる。このため、欠陥の面積を POD の指標とすることが厳密には適切であるが、亀裂の

分岐や亀裂面(超音波の反射面)の凹凸,傾きなどによっても信号強度は影響を受けること,実際の損傷では,欠陥の形状や性状は概ね同等であること,欠陥評価の観点で扱いやすいことなどから,欠陥深さを指標として POD を示すことが多い.

図 1.2-1 に一般的な POD 曲線の形状を示す. 通常の検査であれば,図中の太い実線で示したように,検出限界である欠陥深さ (a_0) までは POD は 0 であり,その値を超えたところから POD が増加し,ある深さ (a_1) 以上の亀裂は概ね 100%検出される. 理想的な環境であれば,図中の細い実線で示すように a_0 を超えたところで POD は急激に上昇し,比較的浅い欠陥でも 100%となる. 一方で,劣悪な環境での検査や,不適切な作業など検査能力が低下している場合には,図中の点線で示すような緩やかな上昇曲線となり,POD が 100%に近づく深さが大きくなる. さらに,超音波の減衰の大きい,いわゆる難探傷部位とされる対象物では, a_0 の値が大きくなることから,図中の破線で示すように検出限界である深さが大きくなり,POD 曲線全体が横方向にシフトする.

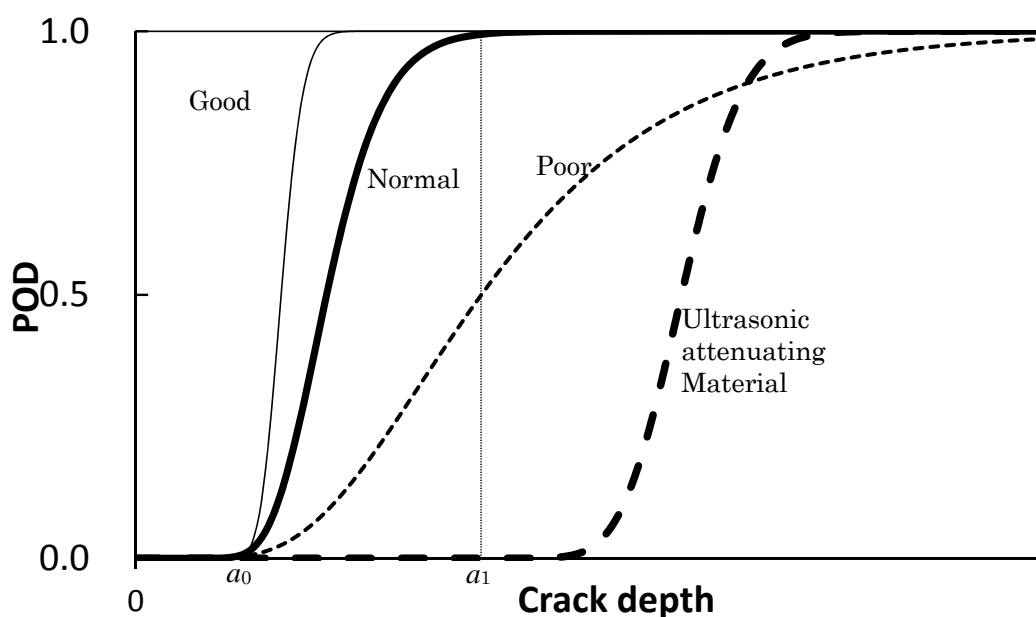


Figure 1.2-1 Schematic diagram of POD curve. In case of good conditions, the POD rise sharply than the normal curve, in poor condition the POD curve gradually rises. For ultrasonic attenuating (difficult to crack detection) materials the POD curve shift laterally.

これらの POD 曲線を示す式は、いくつか提案されている⁽¹⁻²⁵⁻²⁶⁾。式 (1.2-1) はある一定の深さを超えた場合に検出可能となり、ある深さになると 100%検出され、その間を誤差分布（正規分布）で確率的に推移するとしたものである。ここで、 P_{ND} は欠陥信号のときの非検出確率、 ν は POD が 50%のときの傾き、 x は欠陥信号、 x^* は POD が 50%になる位置である。なお、式中の $erfc$ は相補誤差関数であり、式 (1.2-4) で定義される。

式 (1.2-2) は式 (1.2-1) に対し、ある一定の深さ以上であっても 100%検出とはならないと考えるものである。これは適切な検査が行われていない状況、すなわち不適切な手順書や機材、試験技術者の過労などがあり、非常に大きな欠陥であっても見逃す可能性を POD に含めて考えるものである。さらに MIL-HDBK-1823A⁽¹⁻²⁷⁾では式 (1.2-3) が提案されており、この式は、信号検出理論に基づく式として定義されている。式 (1.2-3) は式 (1.2-1) などと比較して、POD が 0.1 近辺の曲線と POD が 0.9 近辺の曲線の形状が異なるという特徴を有している。これらの式は図 1.2-2 に示すように、各パラメータを調整することで、概ね同じ形状となる。

$$POD(x) = 1 - P_{ND} = 1 - \frac{1}{2} erfc\left(\nu \cdot \ln \frac{x}{x^*}\right) \quad (1.2-1)$$

$$POD(x) = 1 - P_{ND} = 1 - \left[\varepsilon + \frac{1}{2} (1 - \varepsilon) \cdot erfc\left(\nu \cdot \ln \frac{x}{x^*}\right) \right] \quad (1.2-2)$$

$$POD(x) = \frac{e^{(b_0 + b_1 \ln(x))}}{1 + e^{(b_0 + b_1 \ln(x))}} \quad (1.2-3)$$

ここで、

$$erfc(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (1.2-4)$$

Becker は、式 (1.2-1) を用いて実際の米国の試験技術者の POD 曲線を推定したが、実際の欠陥の検出実績を基に近似させると、欠陥深さが 0mm であっても検出確率があるなど現実を表しているとは考え難い分布となった⁽¹⁻²⁸⁾。さらに、式 (1.2-1) の想定では、ある程度の大きさの欠陥は全て検出可能となるべきであるが、実際には大きな欠陥でも見逃しがあり、POD=1.0 になることはなかった。

これに対して原子力安全基盤機構の実施した研究⁽¹⁻²⁰⁾では、ステンレス鋼配管溶接部に発生した応力腐食割れ (SCC) の場合には、深さ 3.2mm 以上の欠陥については概ね検出可能であり、それ以下の場合に POD が低下し、概ね深さ 1mm 程度で検出限度となる結果となっている。この結果については次節で詳しく説明する。

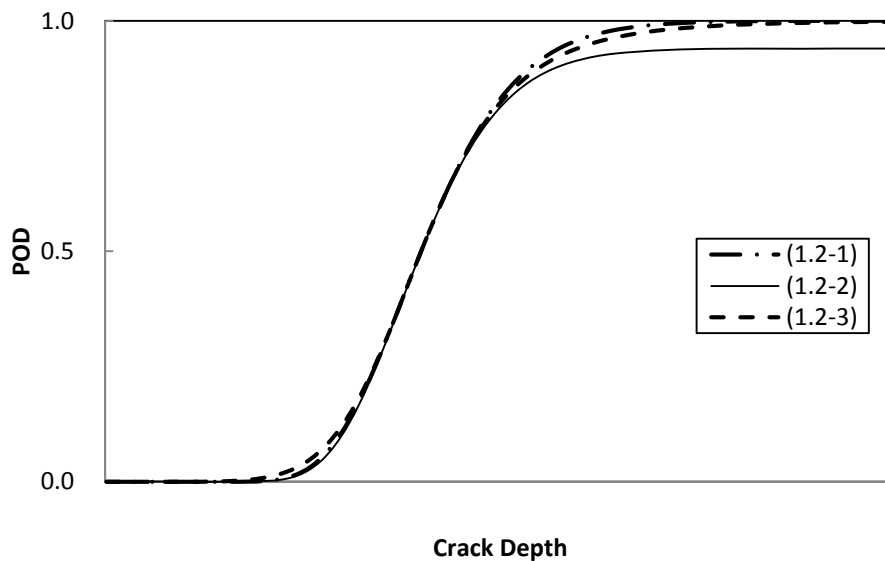


Figure 1.2-2 POD curve represented by each proposed formula. There is a small difference between each curves, although, the shapes of the curves are resemble each other.

検査能力としては POD の他に誤検出率 (False Call Rate : FCR) を考慮する必要がある。POD だけに着目した場合に、疑わしい信号を全て欠陥であると判断すれば、POD は向上するが、欠陥ではない信号も欠陥であると判断することになる。従って、検査能力を議論する場合には POD と FCR を合わせた評価が必要となる⁽¹⁻²⁹⁾。これは信号検出理論に基づく考え方であり、類似した 2 つの信号を判別する能力を定義するものである。これを用いることで FCR と POD の関係を明らかにできる可能性がある。信号検出理論の基本的な考え方は、表 1.2-1 に示すように、信号 (信号刺激) に対する反応として考慮するもので、実際の検出すべき信号 (Signal) とノイズ (Noise) が含まれている信号刺激 (Input) に対して、信号に適切に反応した場合 (Hit)、信号に反応しなかった場合 (Miss)、ノイズに反応した場合 (False Alarm)、ノイズに反応しなかった場合 (Correct Rejection) の 4 ケースで考えるものである。本論文の対象である欠陥の検出試験で考えると、欠陥信号を適切に検出 (Hit) し、欠陥信号のない部分を適切に判断 (Correct Rejection) できること、すなわち POD (欠陥検出確率) が高いことが期待されている。それに対して欠陥の見逃し (Miss) があつた場合には、プラントの健全性を脅かすことになり、最悪の場合には冷却水の漏えいや系統の破損などの多大な損害を与えることも考えられる。また欠陥の誤検出 (False Call) は、その後の確認のために行う追加の探傷作業による時間コスト、軽水炉の場合には必要以上の被ばく線量として影響を及ぼすことになり、場合によっては必要とされない補修工事やプラントの長期停止などの損害を引き起こすことになり、FCR が低いことも求められる。

Table 1.2-1 Basics of signal detection theory

		Judge (Respond)	
		Call (Yes)	No
Reflector (Input)	Crack (Signal)	POD (Hit)	Miss
	Weld root (Noise)	False Call, FCR (False Alarm)	Correct Rejection

これらの見逃し (Miss) や誤検出 (False Call) の比率が多い検査は、結果の信頼性も低いと考えられることから重要な要素と考えられる。

1. 3 軽水炉における検査能力の目安

これまでも、これらの検査能力を定量的に評価する試みがされてきた。代表的なものは、Becker⁽¹⁻²⁸⁾の研究と、国内では原子力安全基盤機構^(1-20,1-30)や、実際の配管で検出された欠陥について調査した結果⁽¹⁻³¹⁾などがある。Becker は、1.2 節で述べた米国の PD 制度発足に先立って行われた試験技術者の探傷試験の結果を分析し、POD を導いているが、PD 試験で用いた試験体情報を秘匿する必要から、対象欠陥の寸法や各々の詳細なデータは開示されていない。このため、本研究では国内の研究成果を活用して検査能力の目安を議論していく。

(1) 原子力安全基盤機構の研究成果

原子力安全基盤機構は、「平成 16 年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書 (超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの[総括版]」⁽¹⁻²⁰⁾ (以下 UTS) として検査能力の評価結果をまとめている (表 1.3-1, 表 1.3-2)。日本国内の研究であることから、日本のプラントの設計に基づいた試験体を用い、探傷手順も日本の規格に合致し、かつ日本の検査会社が使用している一般的な手法を用いて実施したもので、主に日本国内のプラントを対象とした本研究の参考とできる。実際に試験体に疲労亀裂や SCC を付与し、それらに対してブラインド試験 (欠陥付与位置などを秘匿した上で、試験技術者が探傷を行う試験方法) で実施した。照明や作業姿勢などは、比較的良い状態で実施したものであり、作業時間についてもそれほど厳しい時間管理はしていない。また探傷を行った試験技術者は、各検査実施会社から派遣された、比較的熟練の試験技術者である。主に手動探傷によって、欠陥の検出性等を確認した。探傷試験は試験体によっても異なるが、概ね 5 チームが実施した。このため 5 チーム全てが検出できれば検出率 100%としてまとめている。

Table 1.3-1 Result of previous research project and inspection capability
(Austenitic stainless steel piping welds (Fatigue crack)) .⁽¹⁻²⁰⁾

Test specimens thickness (mm)		Piping welds : 10, 25, 35, 50 Nozzle safe end welds : 23, 41		
Crack		Fatigue crack		
Detection	Inspection technique	Manual (include automated result)		
	Minimum crack depth at POD=100%	Total : <1.6 mm 10t:<1.6 23t:<2.1 25t:<2.3 35t:<2.3 41t:<1.8 50t:<2.1		
Depth sizing	Inspection method	Tip echo technique		TOFD
	Average error (μ)	-0.38 mm		-0.35 mm
	Standard deviation (σ)	1.78 mm		0.63 mm
Length Sizing	Inspection method	Threshold DAC 20%		
	Average error (μ)	+5.91 mm		
	Standard deviation (σ)	4.00 mm		
Research project		UTS ⁽¹⁻²⁰⁾		

Table 1.3-2 Result of previous research project and inspection capability
(Austenitic stainless steel piping welds (SCC)) .⁽¹⁻²⁰⁾

Test specimens thickness (mm)		Piping welds : 10, 25, 35, 50 Nozzle safe end welds : 18.5, 47			Piping welds : 18.9, 23.1, 37.5	Actual plant
Crack		SCC			SCC	SCC
Detection	Inspection technique	Manual (include Automated)			Phased array	—
	Minimum crack depth at POD=100%	Total : 3.2mm 10t:2.8 18.5t:<4.4 25t:1.4 35t:<1.7 47t:<5.4 50t:3.4			18.9t:<2.8 23.1t:<3.5 37.5t:<5.6	1.0~ 2.2mm
Depth sizing	Inspection method	Tip echo	TOFD	Combo	Phased array	—
	Average error(μ)	-0.46 mm	-0.42 mm	-0.97 mm	-0.7 mm	—
	Standard deviation (σ)	1.96 mm	1.26 mm	1.89 mm	3.3 mm	—
Length Sizing	Inspection method	Threshold DAC 20%			Threshold DAC 20%	—
	Average error (μ)	+4.58 mm			-0.5 mm	—
	Standard deviation (σ)	5.77 mm			10.7 mm	—
Research project		UTS ⁽¹⁻²⁰⁾			NSA ⁽¹⁻³⁰⁾	(1-31)

疲労亀裂については、付与された疲労亀裂は全て検出可能であったため、明確な検出限度は示されていないが、検出率が 100%となる欠陥の深さは 1.6mm 未満と報告されている。SCC の場合には、検出率が 100%となる欠陥の深さは 3.2mm 程度とされている。すなわち SCC の方が疲労亀裂よりも難しいことが示されており、本研究では SCC を主な対象とする。着目すべき点は、検出率が 100%となる欠陥の深さは、試験体の厚さによらず、概ね一定であることが挙げられる。試験体の厚さに応じて感度校正をする際の基準欠陥（人工欠陥）が大きくなることから、同じ大きさの欠陥から得られる信号強度（エコー高さ、DAC%：基準欠陥からの信号に対する検出信号の比）は、試験体が厚くなるほど小さくなる。また試験体が厚くなるほど、超音波の減衰も顕著になり、SN 比（雑ノイズに対する信号強度）も低下し、識別性が低下する。すなわち、信号強度の観点では試験体の厚さが厚くなるほど検査能力が低下することが予想されるが実際にはそうではないことがわかる。

また、欠陥の深さおよび長さの測定精度についても確認しているが、概ね実際の欠陥寸法を適切に計測可能であることがわかる。

原子力基盤機構は、UTS とは別にフェーズドアレイ超音波探傷技術を使用した研究も実施⁽¹⁻³⁰⁾しているが（略称 NSA）、これは主に欠陥深さの測定精度を評価したものであり、付与欠陥は比較的大きいものとなっている。このため、欠陥の検出性に関するデータは少ないが、試験体の厚さに応じて、深さ 2.8mm 未満から 5.9mm 未満と報告されている。

(2) 国内の実際の検出事例

国内の検出事例を整理したものに、清水らの成果がある⁽¹⁻³¹⁾。これは実際のプラントで検出された欠陥について整理したもので、すなわち熟練者が実機環境で探傷を行った結果であり、その結果を表 1.3-2 に示す。実際にプラントで検出された事例については、最小の SCC は 1.0mm 程度である。実機プラントの探傷事例であるため、欠陥の見逃しがあったかどうかについてのデータは得られていない。

(3) 先行研究の結果の整理

先行研究の結果から、軽水炉の配管に対する ISI における欠陥検出性の目安は以下と考えられる。これらの結果はいずれも ISI の熟練者が実施した場合と考えられる。

- ・深さ 1.0mm 程度の SCC は検出できる可能性がある
- ・検出率がほぼ 100%になる SCC 深さは 3.2mm 程度である
- ・これらの欠陥深さの目安は、通常の ISI 対象となる配管肉厚範囲では、その肉厚によらず一定である
- ・疲労亀裂の方が SCC よりも検出性は良い

すなわち熟練者の検査能力とは、深さ 1mm 以上の SCC は検出の可能性があり、深さ 3.2mm を超える SCC はほぼ 100%検出可能な能力であると言える。なお、これらの SCC 深さはプラントで使用されている配管の肉厚範囲（10～50 mm 程度）では概ね一定である。疲

疲労亀裂よりも SCCの方が難度が高いことから、検査能力の検討では主に SCCを対象とすることで、疲労亀裂についても同等以上の検査能力を示すことができる。

1. 4 研究の目的

本研究では、特に高い健全性が求められる軽水型原子力発電所のクラス 1 配管に対する、供用期間中検査 (ISI) における超音波探傷試験 (UT) を対象として、主に UT 作業に従事する試験技術者の検査能力について検討する。

従来から、日本国内では UT の熟練者が ISI に従事しており、熟練者が実施することで十分な検査能力があるとされてきた。この熟練者の検査能力とは何か、熟練者ではない者との差は何かを明らかにし、その差が何によるものか、探傷作業の違いによるものか、何か特別な知識や観測事象があるかについて確認する。一方で ISI においてプラントの健全性を確認するために求められる検査能力とはどの程度であるかを、実際の ISI の実施手順を考慮した破損確率の観点から求める。またその検査能力は熟練者でなければ達成できないレベルであるか、ISI 経験がなくとも適切な訓練等を受講することで ISI 経験がなくとも達成可能なレベルであるかを明らかにする。さらに ISI 経験の無い者が、プラントの健全性を確認するために求められる検査能力を習得するためには、具体的にどのような訓練や教育を実施する必要があるのかを検討し、訓練などを受講した後の達成度確認はどのようにあるべきかを提案する。

これらの検討によって、プラントの健全性確認を行うために最適な、試験技術者の訓練制度、訓練内容および達成度確認の方法を示す。

1. 5 本論文の構成

本論文は、以下内容から構成される。各章の関係を図 1.5-1 に示す。

第 1 章では、研究の背景とその必要性、目標とする成果について述べ、軽水炉配管の欠陥検出性に関する先行研究の結果を整理した。

第 2 章では、本研究で用いる配管の探傷作業を模擬するシミュレータ (バーチャル UT システム) の開発、およびその有効性の検証結果を報告する。

第 3 章では、3.2 節で実際の試験技術者の探傷技量を明らかにすることを試み、熟練の試験技術者と、ISI 経験のない試験技術者、資格を持たない技術者に対して、バーチャル UT システムを用いた模擬探傷を実施してもらい、欠陥の検出性、欠陥以外の信号に対する誤検出、探傷時間、探傷作業の特徴などを調査した。さらに、3.3 節で実際のプラントでの欠陥検出事例、欠陥以外の信号のデータなどを用いて、得られる情報から適切に評価を行った場合の検査能力などを明らかにする。

第 4 章では、実際の ISI の運用を想定した上で、検査能力と配管系統全体としての損傷確率の関係を計算によって推定する。4.2 節で、現状では全て対策が施されている鋭敏化ステ

ステンレス鋼の SCC および 2000 年頃に顕在化した低炭素ステンレス鋼の SCC を例として、検査能力と系統の破損確率の関係を明らかにする。4.3 節では第 3 章で推定された実際の試験技術者の検査能力が、プラントの健全性の確認に充分であるかどうかを確認する。4.4 節では第 3 章で明らかにした実際の検査能力と、第 4 章で求めた必要とされる欠陥検出確率の関係を整理し、訓練やその達成度確認試験方向性を論じる。

第 5 章では、第 3 章と第 4 章の結果から、訓練の内容や達成度確認試験の内容および判定基準、その有効性について論じる。5.2 節では、第 3 章の結果を基に、熟練者と同様の検査能力を習得するために、試験技術者の訓練で主に指導すべき点を抽出する。5.3 節では、訓練を受講した後の、達成度確認試験の内容および評価基準を検討する。5.4 節では、検討した評価基準に基づいて認定された試験技術者が ISI に従事した場合のプラントの健全性評価について、第 4 章で行った手法を用いて配管系統の損傷確率を基に評価する。

第 6 章では、第 1 章から第 5 章までの議論を整理、まとめると共に、実際のプラントの検査を行うために必要な検討項目や本研究の成果の活用などについて述べる。

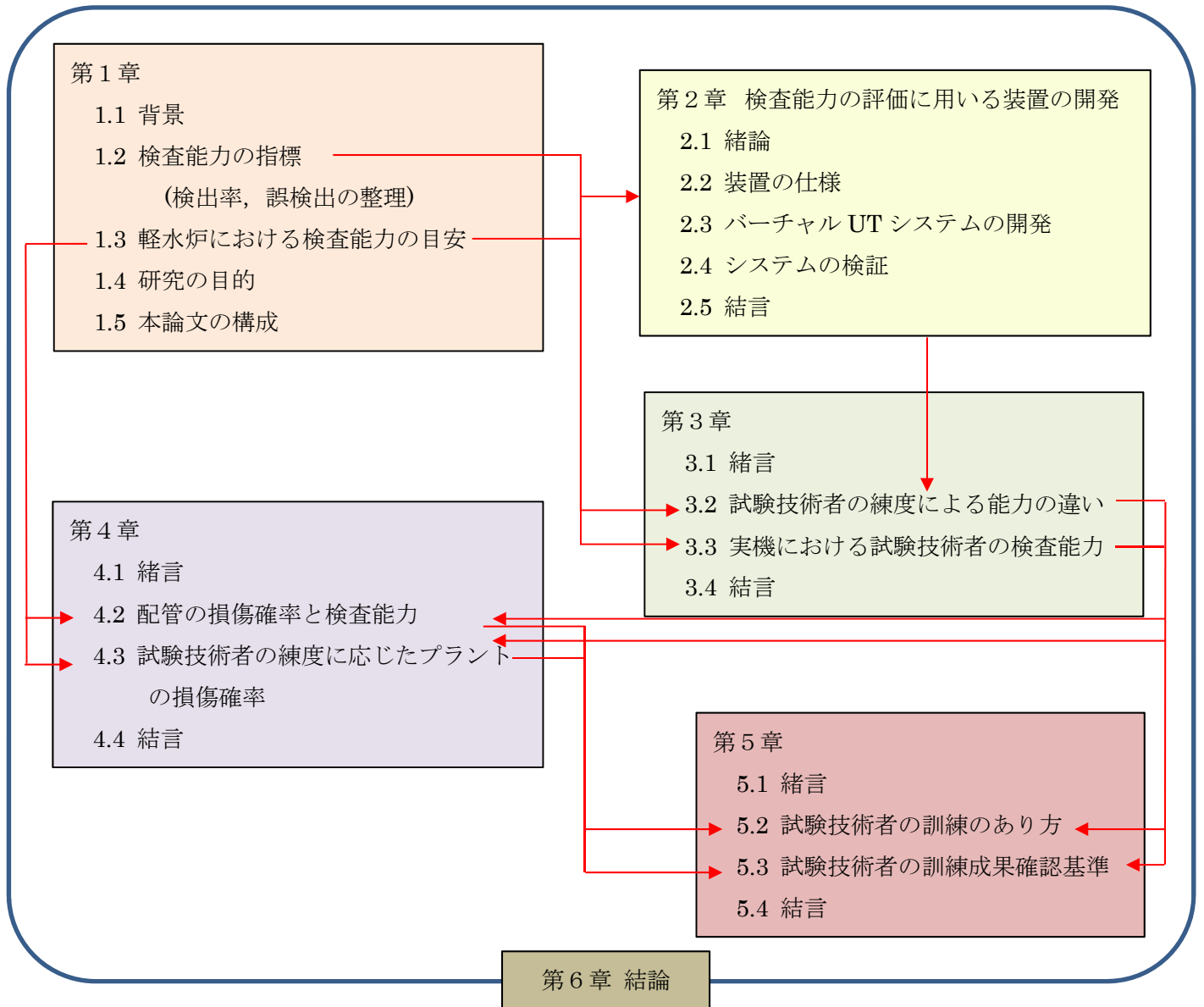


Figure 1.5-1 Structure of this thesis.

1 章 参考文献

- (1-1) 経済産業省 資源エネルギー庁, 「平成 27 年度エネルギーに関する年次報告」, 2016.
- (1-2) Japan Electric Power Information Center, "The electric power industry in Japan", 2013.
- (1-3) 経済産業省 資源エネルギー庁, 「エネルギー基本計画」, 2014.
- (1-4) 一般社団法人 日本原子力産業協会編, 「世界の原子力発電開発の動向」, ISSN0915-0692, 2015
- (1-5) 一般社団法人 日本機械学会編, 「発電用原子力設備規格 維持規格(2012 年版)」, JSME S NA1-2012, 2012.
- (1-6) 一般社団法人 日本電気協会編, 「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」, JEAC4207-2016, 2016.
- (1-7) 日本工業規格, 「非破壊試験技術者の資格及び認証」, JIS Z2305:2013, 2013.
- (1-8) 一般社団法人 日本非破壊検査協会, 「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格および認証」, NDIS0603:2015, 2015.
- (1-9) American Society for Mechanical Engineers, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Appendix VIII, Performance demonstration for ultrasonic examination systems", 2014.
- (1-10) EUROPEAN COMMISSION Directorate General Joint Research Centre, "ENIQ RECOMMENDED PRACTICE 1: INFLUENTIAL/ESSENTIAL PARAMETERS", EUR 21751 EN, 2005.
- (1-11) EUROPEAN COMMISSION Directorate General Joint Research Centre, "ENIQ RECOMMENDED PRACTICE 2: RECOMMENDED CONTENTS FOR A TECHNICAL JUSTIFICATION", EUR 18099 EN, 1998.
- (1-12) EUROPEAN COMMISSION Directorate General Joint Research Centre, "ENIQ RECOMMENDED PRACTICE 3: STRATEGY DOCUMENT FOR TECHNICAL JUSTIFICATION", EUR 18100 EN, 1998.
- (1-13) EUROPEAN COMMISSION Directorate General Joint Research Centre, "ENIQ RECOMMENDED PRACTICE 4: RECOMMENDED CONTENTS FOR THE QUALIFICATION DOSSIER", EUR 18685 EN, 1999.
- (1-14) EUROPEAN COMMISSION Directorate General Joint Research Centre, "ENIQ RECOMMENDED PRACTICE 5: GUIDELINES FOR THE DESIGN OF TEST PIECES AND CONDUCT OF TEST PIECE TRIALS", EUR 18686 EN, 1999.
- (1-15) EUROPEAN COMMISSION Directorate General Joint Research Centre, "ENIQ RECOMMENDED PRACTICE 6: THE USE OF MODELLING IN INSPECTION QUALIFICATION", EUR 19017 EN, 1999.

- (1-16) EUROPEAN COMMISSION Directorate General Joint Research Centre, "ENIQ RECOMMENDED PRACTICE 7: RECOMMENDED GENERAL REQUIREMENTS FOR A BODY OPERATING QUALIFICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTS", EUR 20395 EN, 2002.
- (1-17) EUROPEAN COMMISSION Directorate General Joint Research Centre, "ENIQ Recommended Practice 8 Qualification Levels and Approaches", EUR 21761 EN, 2005.
- (1-18) EUROPEAN COMMISSION Directorate General Joint Research Centre, "ENIQ RECOMMENDED PRACTICE 9: VERIFICATION AND VALIDATION OF STRUCTURAL RELIABILITY MODELS AND ASSOCIATED SOFTWARE TO BE USED IN RISK-INFORMED IN-SERVICE INSPECTION PROGRAMMES", EUR 22228 EN, 2007.
- (1-19) 東海林一, 「諸外国における検査技量認証制度の状況－現状と課題－」, 保全学 Vol.15 No.4 2017, 2017.
- (1-20) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 「平成 16 年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書（超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの[総括版]」, 05 基材報-0001(2/2), 2005.
- (1-21) 平澤泰治, 小林輝男, 牧原善次, 南康雄, 「超音波探傷試験技術者に対する教育・訓練の有効性の検討」, 日本保全学会第 13 回学術講演会 要旨集, 横浜, 7 月 25-27 日, pp.13-17, 2016.
- (1-22) 平澤泰治, 小林輝男, 牧原善次, 南康雄, 「UT 技術者の探傷技量に及ぼす教育・訓練の効果」, 非破壊検査, Vol.66, No.2 pp58-63, 2017.
- (1-23) 町田秀夫, 「SCC き裂を有する配管の信頼性に対する非破壊検査性能の影響」, 日本機械学会論文集 (A 編), 77 巻 782 号(2011-10), pp.1798-1813, 2011.
- (1-24) 永井政貴, 三浦直樹, 東海林一, 「確率論的破壊力学評価を活用した配管健全性評価－破損確率に対する欠陥検出能力の影響評価－」, 電力中央研究所 研究報告書, Q16007, 2017.
- (1-25) Pacific Northwest National Laboratory, "Fatigue Crack Flaw Tolerance in Nuclear Power Plant Piping A Basis for Improvements to ASME Code Section XI Appendix L", NUREG/CR-6934, May 2007.
- (1-26) Pacific Northwest National Laboratory, "Performance Demonstration Tests for Detection of Intergranular Stress Corrosion Cracking", NUREG/CR-4464, 1985.
- (1-27) Department of Defense, "Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment" MIL-HDBK-1823, 2004.
- (1-28) Becker, F. L., "Performance Demonstration – 25 Years of Progress", Proceedings of

Third International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Inspection Qualification V, November 2001.

(1-29) Wickens, T. D., "Elementary Signal Detection Theory", ISBN-10: 0195092503, 2001.

(1-30) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 「平成 18 年度 低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術実証に関する事業報告書[総括版]」, 07 基材報-0003, 2008.

(1-31) 清水敬輔, 設楽親, 小林輝男, 山下理道, 岡田亮兵, 稲垣哲也, 中田親秀, 長松弘幸, 近畑英之, 山本幸司, 栢明彦, 牧原善次, 高津光志, 岩田潔, 東海林一, 「原子炉再循環系配管への超音波探傷試験実施・評価に関するノウハウ」, 保全学, Vol.8, No.4 pp31-36, 2009.

第2章 検査能力の評価に用いる装置の開発

2.1 緒論

軽水型原子力発電所（軽水炉）の供用期間中検査（Inservice Inspection : ISI）^(2-1,2)に従事する試験技術者の検査能力が、その欠陥検出能力に影響を与えられられる。試験技術者の検査能力を把握する方法の一つの方法は、1.1節で述べたPD（Performance Demonstration）制度^(2-3,4)のように、実際に近い作業環境で、欠陥の位置や数、性状等を秘匿し、欠陥検出性試験を行うことで評価することが考えられる。この方法は、実際に、かつ直接的に欠陥の検出能力などを確認することができる。

一方で試験技術者の検査能力とは何か、その検査能力が何によるものか把握するためには、実際の探傷作業の特徴を把握する必要がある。図 2.1-1 に手動探傷の状況を示す。手動探傷では試験技術者が探触子（センサ）を走査し、探触子から超音波が発信され、その反射波を探触子で受信、受信波が超音波探傷器の画面に表示され、それを試験技術者が確認し、記録する。反射波は、探触子が接触している位置、角度（首振り角）、カプラント（超音波を伝搬させるための接触媒質：一般的に油やグリセリン系ペースト）の状態などの条件に応じて変化する。試験技術者の検査能力が、探触子の走査方法によるものであるとした場合に、熟練者の走査方法の特徴を把握し、その特徴を訓練などによって会得することができれば、熟練者の検査能力に達することができる。すなわち熟練者がどのような探触子走査を行っているのか、それは熟練者以外と何が違うのかを把握する必要がある。

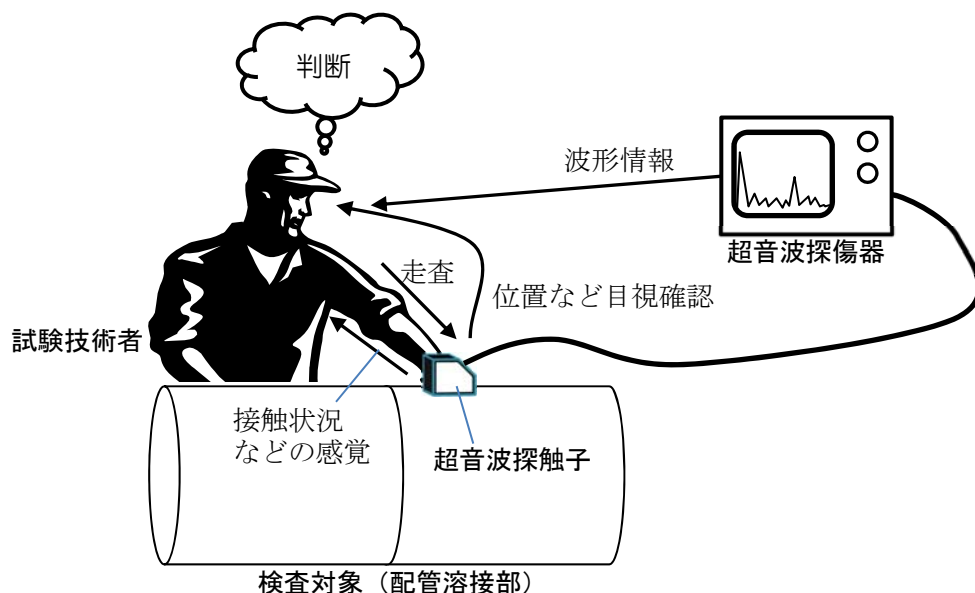


Figure 2.1-1 Conceptual drawing of manual ultrasonic testing.

しかし実際の探傷作業を、例えばビデオ等で記録したとしても、手動探傷では探触子の向きや接触状況、走査状況を詳細に解析することは困難である。すなわち、試験技術者の検査能力を評価する上で、探触子走査に関する情報を適切に記録、評価する必要がある、そのために実際の探傷作業（あるいはそれを模擬した作業）を行いながら、探触子の状況を記録する新たな手法が必要になる。

本章では、試験技術者の探傷作業を評価するために必要な、実際の探傷作業を模擬し、より実際に近い探傷作業を記録できる装置を開発する⁽²⁻⁵⁾。

2. 2 装置の仕様

検査能力の評価を行う装置を開発するにあたって、その仕様を検討する。基本的な機能は、配管溶接部の超音波探傷作業をできる限り模擬できること、その作業における超音波探触子の状況を記録できることの2点である。

実際の配管溶接部の探傷作業を模擬する観点から、考えられる要求仕様は以下の通りである。

- (a) 対象物は配管形状であること
- (b) 探触子の状況に対応した、超音波探傷波形が表示されること
 - b-1：探触子が接触しているときにのみ、波形が表示される
 - b-2：探触子の位置（配管上の位置）に応じた波形が表示される
 - b-3：探触子の角度（首振り角）に応じた波形が表示される
- (c) 表示される波形は、実配管探傷と同等であること
 - c-1：複雑な超音波伝搬状況が反映された、実際に近い波形であること
 - c-2：その他違和感の無い波形表示であること
- (d) 探傷器や探触子の操作（走査）は実機と同等であること
 - d-1：感度調整などが可能であること
 - d-2：実際の作業と異なる、作業を制限する機器・配線等のないこと

市中で活用されている超音波探傷シミュレータとされるものの多くは⁽²⁻⁶⁾、パソコンを用い、パソコンマウスを探触子とみなして走査するものや、画面内の探触子をマウスで走査するものが多く、(a)の要求には合致せず、一部の装置は模式的な探傷波形を表示するもので、(c)の要求にも合致しない。このことから、本研究ではこれらの要求に合致する装置を開発する。

装置の開発において、重要な要素は探触子（あるいは模擬探触子）の位置および角度、接触状況を検出する機構である。またその位置検出の要求精度は、実機ではスケールを当てて試験技術者が探触子の位置を計測していること、探傷の基準となるケガキ線などはマジックペンなどで描かれることから、誤差 1mm 程度以内、角度 2° 以内程度と考えられる。位置、角度の計測技術として、配管表面上に感圧センサや静電検知接触センサを配置する方法も考えられるが、試験技術者が配管表面に触れることもあり適切ではない。カメラによる画像認識

の手法は探触子を試験技術者が手で包むように持った場合には検知不能になる。機械的な検知機構では探傷作業の妨げになる。これを解決する手段として、電磁気式3次元位置センサを使用することが考えられる。当該センサは、親機と子機、制御装置から構成され、親機を基準とした子機の位置および角度の6軸情報を最大で毎秒120回計測できるものである。このセンサの難点は、電磁氣的に計測していることから、親機と子機の周辺に導電体がある場合に、計測精度が低下し、場合によっては計測できないこともある。すなわち実際の金属製の配管を用いた探傷に適用しても位置が検出できない。このため実際の探傷ではなく、模擬的な探傷作業とし、模擬配管上を模擬探触子で走査し、その探傷位置に対応する波形を表示させるシステムとする。このセンサを用いることで、作業性については、3次元位置センサはケーブル1本のみで動作可能であることから、要求仕様に合致できた。これによって、(a)(b)およびd-2の要求事項を解決することができる。

上記(c)の表示波形については、実際の配管溶接部の探傷データをそのまま用いることで、波形の実機模擬性の問題を解決した。他に実際の探傷との差を感じる要素として、表示波形の時間遅れが考えられる。実際の超音波探傷では、アナログ式探傷器の場合には時間遅れは数ms程度、デジタル式探傷器でも数十ms程度で表示される。一方でヒトが時間遅れを検知可能である値は40~50ms程度とされている⁽²⁷⁾。電磁氣的3次元位置センサは最大120Hz(8ms)で計測可能であるが、PCを用いて使用して、位置情報から波形を表示させることから、画面の表示レート(一般的には50~60Hz程度=20ms程度)となる。この速度で波形を表示させるためには、記録されている波形を表示する場合でも、ハードディスク等の記憶媒体に保存されたデータでは間に合わない。そこで波形データは全てPCのオンボードメモリ上に常駐させ、それを表示させることで、波形表示遅れを最小とすることとした。

残るd-1については、感度調整可能なソフトウェアとすると共に、感度を上げた場合の表示波形の分解能が低下しないように、最大16bitの波形データを用いることとした。これらの検討で得られた要求仕様を表2.2-1に示す。

Table 2.2-1 Basic requirement for UT simulator

No.	項目	内容 (試作機仕様)	設定理由
1	主要機能	探触子の位置,角度,接触によって波形を表示 (探触子位置を電磁気式3D位置センサで検知)	実際の超音波探傷試験作業を模擬
2	位置等の検出精度	表面位置; ±1mm 首振角±2°	実機では、スケールにより1mm単位で計測
3	表示の応答性	時間遅れを感じないこと(40ms程度以下)	実際の探傷器の時間遅れは、ヒトは感知できない
4	表示波形	実際の探傷波形と類似であること(小型試験体の実際の探傷波形から合成)	波形を基に試験技術者は判断している
5	表示波形分解能	画面の1%以下 (12bit以上分解: 1/4096)	実際の超音波探傷試験では画面の1%単位で記録する

2. 3 バーチャル UT システムの開発

要求仕様に基づいて、検査能力の評価に用いる装置として、バーチャル UT システムを開発した。まずプロトタイプを製作し、その結果を基にシステムを完成させた。図 2.3-1 にプロトタイプの全体外観、図 2.3-2 にシステム構成図を示す。

本システムは主に、2つのモニターを有する PC と電磁気式 3次元位置センサ、模擬配管および模擬探触子から構成される。模擬配管および模擬探触子は、電磁気式 3次元位置センサの計測精度を低下させないように、非金属（塩化ビニール等のプラスチック）で製作してある。

電磁気式 3次元位置センサは、本体と基準位置となる親機、計測対象である子機から構成され、親機に対する子機の相対的な位置と角度（計 6 軸）を検出する。親機は模擬配管内部に固定し、子機は探触子の形状を模したケースに入れて模擬探触子としている。模擬配管には、基準位置の目安となる基準線が、実際の配管を採傷する際の溶接中心を示すマーキングと同様に描かれている。

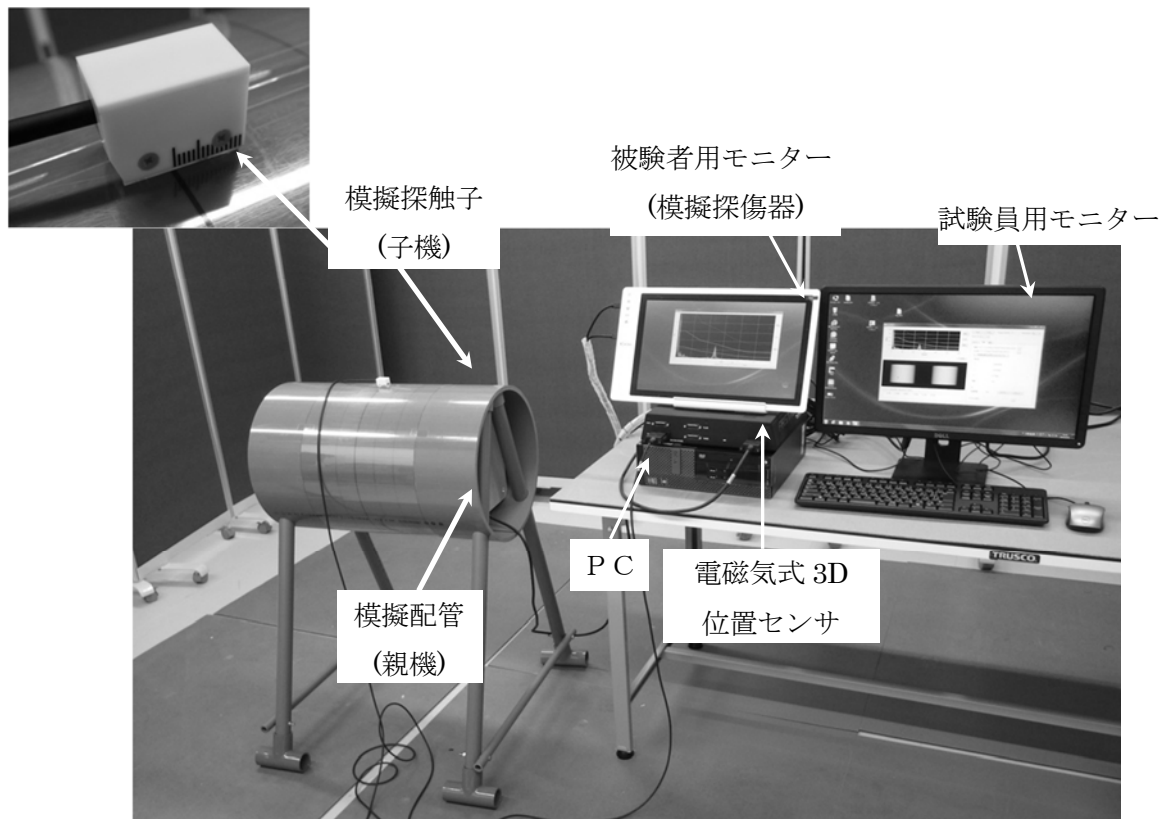


Figure 2.3-1 Photo of virtual UT system prototype (UT simulator).

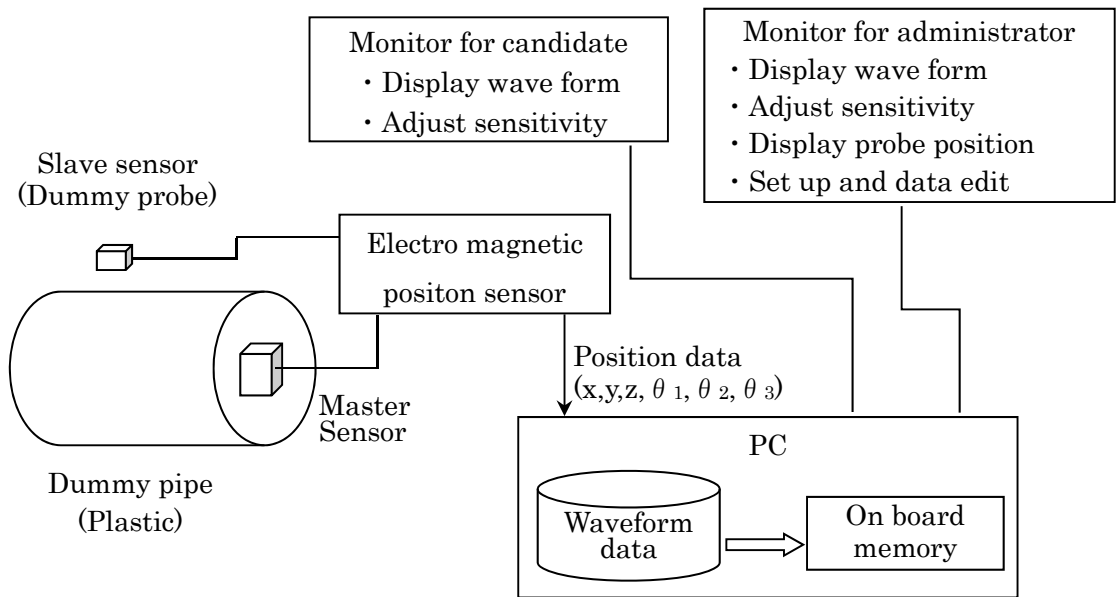


Figure 2.3-2 System drawing of virtual UT system.

模擬配管上を模擬探触子で実際の配管溶接部の探傷作業のように走査すると、電磁気式 3 次元位置センサが、その相対的な位置と角度を、毎秒 120 回の頻度で計測し、計測値を USB ポートを経由して PC に送信する。PC は 6 軸の計測値から、模擬配管表面上の模擬探触子の位置、および角度（首振り角）、接触の有無（模擬配管表面からの距離）を計算し、その位置と角度に応じて、予め保存されている探傷波形を表示させる。模擬配管表面から概ね 3mm 以上離れた場合には、模擬探触子が接触していないと判断し、探傷波形は表示しない。

模擬配管およびその架台や模擬探触子、模擬探触子位置を計測するスケールなどは、非金属材料で構成し、電磁気的 3 次元位置センサの誤差の発生を抑えているが、周囲の作業台や建物の鉄筋などにより、電磁気的 3 次元位置センサにずれが生じたり、機器固有の誤差が発生したりする場合はある。これらの誤差は、主に電磁界の歪みによるものと考えられることから、2 次式による補正を取り入れた。補正計算は式 (2.3-1) に示す計算を行った。

$$\begin{aligned}
 f_x &= a_0 + a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4xy + a_5yz + a_6xz + a_7x + a_8y + a_9z \\
 f_y &= b_0 + b_1x^2 + b_2y^2 + b_3z^2 + b_4xy + b_5yz + b_6xz + b_7x + b_8y + b_9z \\
 f_z &= c_0 + c_1x^2 + c_2y^2 + c_3z^2 + c_4xy + c_5yz + c_6xz + c_7x + c_8y + c_9z \quad \dots \dots \dots (2.3-1)
 \end{aligned}$$

ここで、 x, y, z : 測定センサ出力

f_x, f_y, f_z : 補正後の x, y, z 座標値

a_i, b_i, c_i : 全校正点の最小自乗補正值

システムを設置する場所で、図 2.3-3 に示すように模擬配管上の描かれた配管軸方向の 5 点および周方向の 8 点の計 40 点で、それぞれ位置におけるセンサの出力 (x,y,z) を測定し、実際の子機（模擬探触子）の位置との誤差が 40 点全体で最小となるような、式 2.3-1 の補正パラメータ $(a_0\sim a_9, b_0\sim b_9, c_0\sim c_9)$ を最小二乗法で導出する。その補正パラメータを用いて模擬探触子位置を補正することで、位置の測定誤差を 1mm 以内に抑えることに成功した。実際の探傷では探触子の位置を鋼製のスケールなどで記録することから、1mm 程度の誤差があると推定され、本システムの位置誤差と同程度であり、実用上問題ないものと考えられる。

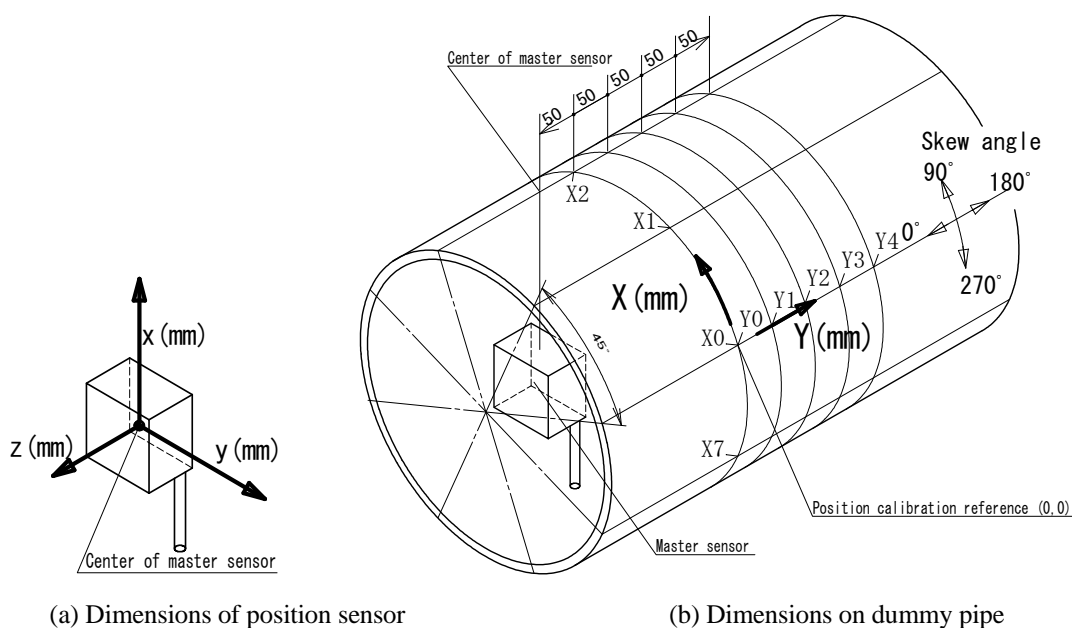


Figure 2.3-3 Positioning dimension of virtual UT system.

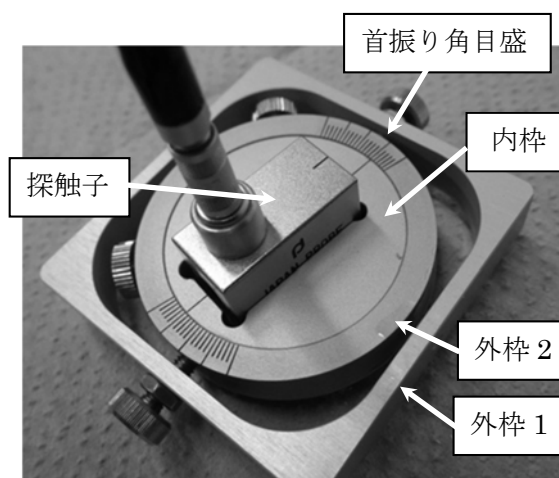


Figure 2.3-4 Probe holder for skewing data acquisition.

探傷波形の表示は、模擬探触子の走査に対して遅れがないようにする必要があるので、PC上のメモリに全て格納する方式とした。探傷波形については、超音波伝搬シミュレーションで生成することも可能であるが計算時間が非常に長いこと、実際の探傷波形との違いについての議論を避けるために、実際の試験体からあらかじめ採取し、それを表示する方式とした。別途製作した配管試験体を瓦状に分割し、分割範囲ごとに無欠陥状態でデータを採取した、その後欠陥を付与した後に探傷データを採取した。データ採取は探触子の角度（首振り角）のデータを採取するために、通常の自動探傷装置に図 2.3-4 に示す探触子保持機構を取り付けてデータを採取した。角度によってデータがずれないように、超音波の入射点（見かけ上の超音波ビームが放出される中心点）を基準に回転する構造としている。探触子の角度によるデータは、配管軸方向から $+10^{\circ}$ ～ -10° の範囲で 2° 毎に記録した。さらに、配管の上流側からの探傷と下流側からの探傷のデータを持たせた。さらに波形データは通常の ISI で求められている走査範囲（検査範囲）よりも広く採取した。

当該装置を用いて、試験技術者の技量評価を行う上で、走査軌跡（走査ログ）を記録する機能も付加した。任意の時間間隔で模擬探触子の位置、首振り角、模擬配管への接触有無を記録することとし、記録間隔は初期設定で 0.1 秒間隔とした。また、記録されたデータを視覚的に表示させるソフトウェアも開発し、どのような経路で探傷を行っているか、どの部分を重点的に探傷しているかを視覚的につかむことができるようにした。図 2.3-5 に記録された熟練者の実施した探傷走査軌跡の例を示す。この例は模擬探触子が模擬配管上に接しているときの配管表面上の位置を示しており、横方向が配管の周方向の約 1/4 周、縦方向が配管の軸方向を示している。一般的には溶接線に対して探触子を前後方向に走査させながら、配管の周方向に少しずつずらしていくような、ジグザグの動きをする。この例では、検査範囲全体に対して粗い走査を行い、欠陥信号が記録された位置ではより詳細にゆっくりとした走査速度で信号を確認していることが示されている。

プロトタイプ製作を通じ、使用上の改善点がいくつか確認されたことから、実際に使用する装置では、以下の修正を行った⁽²⁾⁽⁸⁾。

- ・波形の自然さや揺らぎを再現するために、ホワイトノイズのデータを表示する波形に計算する機能を付加した。
- ・オンボードメモリを最大 32GByte まで増加させ、350A 配管の上下流側両側の探傷に対応可能とした。
- ・電磁気式 3次元位置センサと PC を一体化し、可搬性を向上させた。
- ・対象配管口径を、大口径、中口径、小口径の 3 口径に対応可能とした。

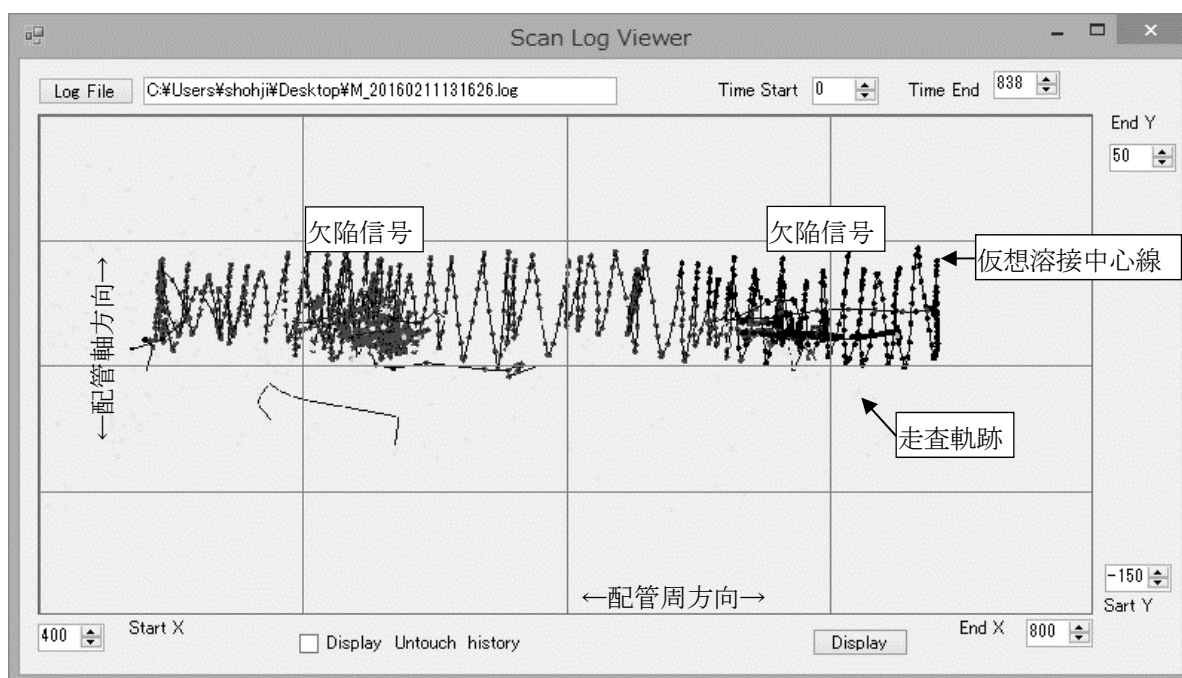


Figure 2.3-5 Software for scan log display.

開発したバーチャル UT システムの特徴を以下に挙げる。

- ① 実際の配管の探傷作業をほぼ模擬しており，探傷作業の障害となるケーブル類やセンサ類を必要としない。
- ② 模擬探触子の首振り角 (Skew) に応じて波形が変化することで，同一箇所にて探触子を当てた場合でも異なる波形が表示される．さらにホワイトノイズを加算することで試験技術者のエコー高さ等の読み取りの揺らぎなどを再現できる。
- ③ 波形データを編集することで，既存の試験体の探傷データから多数の試験体データを生成できる．また同一データの位置を替えるなどによって，同一データに対する探傷結果の違いなどを違和感なく試験することができる。
- ④ 作業性や周辺環境などを揃えた上で，探傷データの違いの影響を抽出することができる。
- ⑤ 実際の探傷波形を用いることで，探傷波形による判別の影響を抽出できる。
- ⑥ 探傷中の模擬探触子の位置，首振り角，接触の有無を記録することができ，オフラインで探傷作業の特徴などを解析することが可能である。

本システムを用いて，UT 試験技術者の特徴を把握する試験を行うことができるとともに，試験技術者の訓練や，技量認定試験にも活用なものであると考えられり，第3章では開発した本システムを利用して，試験技術者の検査能力を明らかにすると共に，熟練者の検査作業の特徴を抽出する。

2. 4 システムの検証

本システムは、模擬探触子の位置や角度を記録することで、実際の探傷作業を記録することができるが、その作業が実機の探傷と比べて同等かどうかの検証を行った。試験技術者の特徴を計測することを目的としたものであることから、試験技術者が実際の探傷との違いを感じるかどうかの観点で評価を行うこととした。

開発に関与していない試験技術者として、国内外の PD 試験関係者、訓練制度の検討を実施している者、実際の現場での探傷経験のある者に対して、本装置を用いた探傷を実施してもらい、その感触についてヒアリングを行った。ヒアリングは最初に試作したプロトタイプについて実施し、その後の完成システムで対処しているものも含まれている。ヒアリングの結果を表 2.4-1 に示す。

ここで示すように、実探傷の模擬性に関する否定的な意見は得られていない。システムやソフトウェアの完成度に関する意見は多いが、プロトタイプ以降の改良で改善しつつあること、本来の試験技術者の探傷作業の見える化という観点では影響はないと考える。

これらのことから本システムを用いて、UT 試験技術者の特徴を把握する試験を実施することは問題ないと考えられ、試験技術者の訓練や、技量認定試験にも活用なものであると考えられる。

2. 5 結 言

試験技術者が、実際の探傷作業と比べて、ほぼ違和感なく探傷作業を行うことができ、かつ実際の探触子の走査を記録することができる、超音波探傷シミュレータ（バーチャル UT システム）を開発した。開発したシステムは、電磁気式センサを用い、かつ位置補正計算を加えることで精度よく探傷作業を再現することができ、実際の探傷データを使用することで探傷のリアルさも確保することができた。本システムを用いて、UT 試験技術者の特徴を把握する試験を行うことを可能とし、試験技術者の訓練や、技量認定試験にも活用なものであると考えられる。第 3 章では開発した本システムを利用して、試験技術者の検査能力を明らかにすると共に、熟練者の検査作業の特徴を抽出する。

Table 2.4-1 List of hearing results.

No.	項目	具体的内容	補足
1	全般事項		
1-1	探傷のリアルさ	実際の探傷作業と遜色ない印象である。	
1-2	システム構成	可搬性もあってよい。	
1-3	コスト	将来的に多数必要になる。量産コストを小さくする工夫を期待する。	位置決めシステムが高価のため
1-4	コンセプト	考え方は良い。訓練制度に活用できる。	
2	各種センサ類		
2-1	電磁気式3D位置センサ	<ul style="list-style-type: none"> プラスチック製スケールは、扱いやすいものとする。 金属品を受験者にはずしてもらうことは問題ではないと思う。 	
2-2	カプラント(水分)センサ	<ul style="list-style-type: none"> 機能としてはあってもよいが、必要性は低い。 カプラントを使うと手や周辺も汚れるので、カプラントは無い方がよい。 	カプラントの扱いについては、実物で確認
2-3	模擬探触子の接触検知	<ul style="list-style-type: none"> 接触有無を位置データで設定しているが、若干違和感がある(少し浮かせても表示) 	
3	表示波形データ		
3-1	波形のリアルさ	<ul style="list-style-type: none"> ランダムノイズを加算することで、常に波形が動いているような印象がありリアル。 首振りの効果を入れることによって、同じ範囲を走査しても表示波形が違うことがある。エコーピークを見つける訓練としては良い。 	プロトタイプでは固定ノイズだったが改良済
3-3	データ容量	データ容量が将来的に問題になると思われる。メモリの増加やSSDの活用などを考慮すべき	メモリの増加で対応済
3-4	分解能	表示感度を下げた場合にオーバフロー分が表示されない。また感度を上げて表示させた場合に粗くなる。分解能を高くすること。	16bitに改造済(プロトタイプは8bit)
3-5	首振データ	<ul style="list-style-type: none"> 首振りデータに加えて、反対側からの探傷データも同じデータで表示させる必要がある。欠陥か否かの判断で、反対側からの探傷を行うことがある。 実機の探傷事例など首振りデータがないものもある。首振りデータを必須とせずに汎用性をもたせてほしい。 	メモリの増強で対応済
4	その他		
4-1	模擬配管の色	塩ビ管の色はイメージが違う。金属色に塗装するなどの工夫を期待する。	
4-2	ソフトウェア	ソフトウェアとしての完成度は未だ低いように思う。使い勝手などを考慮し、だれでも扱えるようにしてほしい。	プロトタイプでの指摘(改良済)
4-3	フェーズドアレイの活用	フェーズドアレイを活用するなど、首振りデータ採取の手間を最小化することを検討すること。	
4-4	シミュレーションデータ	シミュレーションで生成したデータ(有限要素法による計算など)も使用できるようにすること。	対応可(本研究では実波形データを使用)
4-5	データの管理	試験に使用することを考えると、ソフトやデータの管理方法も検討すること。	今後検討

2章 参考文献

- (2-1) 一般社団法人 日本機械学会編「発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版)」, JSME S NA1-2012, 2012.
- (2-2) 一般社団法人 日本電気協会編, 「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」, JEAC4207-2016, 2016.
- (2-3) 一般社団法人 日本非破壊検査協会, 「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格および認証」, NDIS0603:2015, 2015.
- (2-4) American Society for Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Appendix VIII, Performance demonstration for ultrasonic examination systems, 2014.
- (2-5) 東海林一, 秀耕一郎, 「技量認定試験に使用可能なバーチャルUTシステムの試作」, 電力中央研究所 研究報告書, Q14007, 2015.
- (2-6) 南康雄, 「超音波探傷入門(パソコンによる実技演習 DL 版「デジタル超音波探傷器」編」, 一般社団法人 日本非破壊検査協会, 2013.
- (2-7) 岡本正吾, 昆陽雅司, 嵯峨智, 田所諭, 「皮膚感覚呈示における時間遅れの影響調査と検知限の同定」, 第13回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp.153-158, 2008.
- (2-8) 東海林一, 「バーチャル UT システムを用いた検査員の技量向上の検討」, 電力中央研究所 研究報告書, Q16012, 2017.

第3章 熟練者の検査能力

3.1 緒言

軽水型原子力発電所などの重要機器は、供用期間中検査（Inservice Inspection: ISI）として、定期的に主に超音波探傷試験（Ultrasonic Testing: UT）を用いた健全性確認が行われている^(3-1,2)。UTの結果の信頼性は、一般的に試験を実施する試験技術者の技量の影響を受けるとされ、特に試験技術者が超音波探触子を走査し、現場の判断で信号（エコー）を記録する手動 UT では試験技術者の技量の影響が大きいとされている。試験技術者は一般的に日本非破壊検査協会による技量認定試験⁽³⁻³⁾の超音波探傷試験レベル1以上に合格した技術者であるが、その技量認定試験の内容は、UTに関する知識についての筆記試験と、主に製造時の欠陥検出を対象とした技量確認試験が主体となっている。このため運転中に発生する損傷を対象とした ISI、特に配管溶接部近傍で危惧される応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking: SCC）を検出するような技量の確認は行われていない。

米国等では、米国機械学会（ASME）規格⁽³⁻⁴⁾にもとづいた PD 制度（Performance Demonstration）によって、実際に探傷技量があることを確認する制度⁽³⁻⁵⁾が運用されている。これに対し日本国内では熟練した試験技術者が UT を実施することで、十分な検査能力を発揮されたとの研究結果⁽³⁻⁶⁾があることから、欠陥の検出について PD 制度は適用されていない。さらに熟練した試験技術者が ISI の UT を実際に実施しながら新人を育成していく OJT（On the Job Training）のような運用や、プラントメーカーが独自に実施する技量認定試験や教育訓練などによって試験技術者の熟練度を向上させる取り組みが自主的に行われてきたこともあり、試験技術者の技量が特に問題になることはなかった。しかし、近年の軽水炉の稼働状況では、試験技術者が経験を重ねる場が失われており、さらに熟練した試験技術者も他分野に流出している。原子力への否定的な世論もあり、再稼働後に熟練した試験技術者を必要数確保できない可能性も危惧される。

これに対し、試験技術者に対して適切な訓練を実施することで、熟練者と同じ検査能力を発揮させるための検討も進められている⁽³⁻⁷⁾。従来からも、検査実施会社毎に実技訓練や講習、認定試験等を通じて技量確認を行ってきたが、統一的な基準は設定されていない。すなわち、“熟練者”とはどのような技量を有している者であるかが明確化されていない。熟練者と判断する指標として、UT 有資格者としての経験年数、ISI 実施年数、実際に探傷を行った配管溶接継手数などが考えられるが、作業経験を判断する指標としては妥当と考えられるものの、探傷技量の評価指標としては相応しくない。実際の欠陥検出経験を挙げることができても、ISI で実際に欠陥を検出する事例は少なく、また技量の評価指標としても妥当であるとは考え難い。

本章では、熟練した試験技術者の技量を明らかにすることを目的として、第2章で示したバーチャル UT システム(V-UT)を使用した熟練の試験技術者の検査能力の特徴の解明、実機探傷事例および探傷技量に関する研究成果を基にした熟練の試験技術者の検査能力を検討する。

3. 2 試験技術者の練度による能力の違い

3. 2. 1 模擬探傷の実施

具体的な検査能力とは何かを明らかにするために、第2章で開発したバーチャル UT システム(3-8,9)を使用した模擬探傷を実施した。

(1) 被験者の選定

軽水炉の ISI を実施する主体は電気事業者（電力会社）であるが、実際の ISI はプラントメーカーが受注し、プラントメーカーが検査会社に委託し、検査会社に所属している試験技術者が実際に探傷を行っている。ISI における UT、特にステンレス鋼配管溶接部の SCC を対象とした探傷経験が豊富である試験技術者はそれほど多くは無い。代表的な検査会社に対し、動員可能な熟練試験技術者数を調査したところ、10 名程度が限度であったことから、熟練試験技術者と比較するために動員するその他の被験者の数も同数程度に設定した。表 3.2-1 に被験者のグループ分けと、各グループに属する被験者の経験、人数を示す。

ここで示すように、熟練者は実際に招集可能であった 9 名を対象とし、熟練者の特徴を把握するために、UT レベル 2 以上の資格は有しているが ISI 経験のない者（有資格者）、UT 資格を有していない者（無資格者）も対象として調査した。

熟練者は実際の ISI 経験を有しているが、日本国内のプラント稼働状況から、ここ 5 年程は ISI に従事していない。年齢は 50 代が主であるが、40 代、30 代も含まれる。ISI 経験は 30 年以上の者から数年の経験の者も含まれる。ISI に従事している期間以外でも UT を主とした業務を実施している。

有資格者は、UT 資格を有しているが、通常は超音波板厚計測や製造時の検査など比較的簡単な探傷を行っている者が多く、ISI 経験はないが、数名は発電所内での ISI 以外の作業経験はある。年齢は 30 代から 40 代で、業務としての UT の経験年数は 20 年程度である。

無資格者は、UT 検査の補助員としてデータの記録を業務としている者や、通常は浸透探傷試験や巡視点検など他の検査関連業務に従事している者、UT 資格を取得すべく勉強中の者も含まれ、検査会社に所属しており、UT の概略的な知識は有している。年代は幅広く、20 代から 50 代まで概ね均等に含まれる。検査業務としての作業経験は 1 年未満の者も含

Table 3.2-1 Grouping of subjects participating in the flaw detection test using virtual UT system.

グループ	経験等	対象人数
熟練者	ISI においてステンレス鋼配管溶接部の SCC 探傷経験のある者 ・直近 5 年程の ISI 従事はない ・実際に SCC を検出した経験のある者も約半数あり	9
有資格者	UT 資格は有しているが ISI での SCC 探傷経験のない者 ・通常の業務は、超音波厚さ計測など ・UT 資格を取得して 1 年未満の者はいない	10
無資格者	UT 資格を有していない者 ・通常の業務は、浸透探傷試験や巡視点検など ・検査会社に所属し、UT の概略的な知識は有している	15

めて 20 年程度までである。

なお、全ての被験者は男性で、母国語が日本語であり、コミュニケーションに障害のあることはない。

(2) 模擬探傷データ

バーチャル UT システムを用いた模擬探傷で使用する UT データは、人工欠陥を付与したステンレス鋼配管溶接部試験体を用いて取得した。試験体は沸騰水型炉 (BWR) の再循環系配管を想定したものとした (図 3.2-1)。試験体の口径は 350A (外径 ϕ 355.6mm) とし、母材部の厚さ 27.8mm、溶接部は実機と同様に内面加工を行い、厚さ 25mm とした。溶接開先形状は一般的な開先 (60° 開先) とし、初層ティグ溶接、残層被覆アーク溶接の一般的な溶接方法で製作した。

試験体を外周長で 80mm の範囲で区分し、欠陥付与前に UT データを採取した。その後に 8 箇所人工欠陥を付与し、UT データを再び採取した。人工欠陥は表 3.2-2 に示す通りの欠陥とし、傾いている欠陥、長さの短いもの、溶接部に非常に近いものなどを作製した。付与した欠陥は多数あるが、統計的評価を可能とするために、実際に模擬探傷に使用した欠陥は、表 3.2-2 に Apply と示す 5 個のみに限定した。

探傷データは、実際の ISI で欠陥を検出する主な手法である横波斜角探傷法を用い、屈折角 45° 、周波数 2MHz のデータを用いた。採取されたデータは、人工欠陥からの信号 (エコー) の他に、溶接裏波形状 (溶接による配管内面側の凸形状) による信号、溶接金属組織による信号なども含まれている。

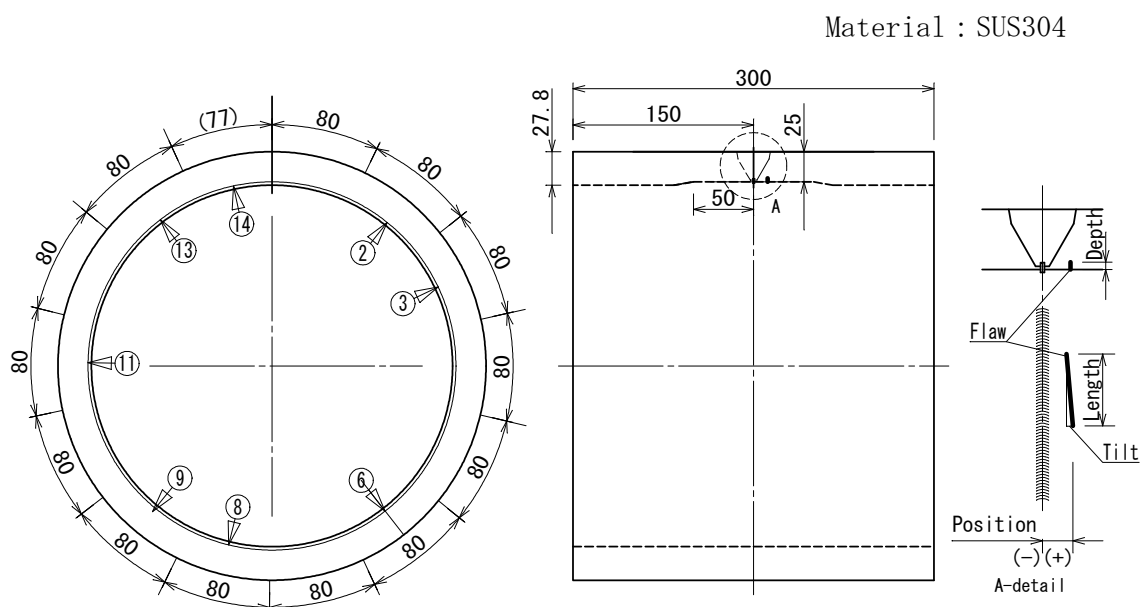


Figure 3.2-1 Test specimen for virtual UT system data.

Table 3.2-2 Artificial flaw specifications.

ID	Depth (mm)	Length (mm)	Tilt (°)	Distance from weld center(mm)*	Apply
②	1.0	20	0	+5	Apply
③	0.6	38	2	-8	—
⑥	0.8	18	-5	+8	—
⑧	0.6	10	-6	+10	—
⑨	0.6	38	0	-7	Apply
⑪	0.8	18	0	-5	Apply
⑬	0.6	10	0	+17	Apply
⑭	0.6	10	0	+5	Apply

*: +=Upstream, -=Downstream

(3) 模擬探傷試験の概要

模擬探傷試験の概要を表 3.2-3 に、実施場所の状況を図 3.2-2 に示す。

実施場所は被験者の所属する検査実施会社の事務所内とし、心理的にも落ち着ける環境とした。また、騒音や振動からは隔離され、照明や空調も適切に実施され、良好な環境となっている。事前に本試験の目的等を説明し、個別の結果を公表しないことなどを伝え、さらに模擬探傷では室内に被験者と記録者（試験者）のみがいるようにし、心理的不安感を取り除くようにしている。

事前説明では目的の説明や、バーチャル UT システムの使用方法、無資格者と有資格者に対しては、対象となる欠陥とその信号の特徴を簡単に説明した。

その後、バーチャル UT システムを用いた模擬探傷 1 を実施する。模擬探傷 1 は 20 分の制限時間を設けるが、進捗によって 20 分間の延長を認めた。配管の半周の上流側および下

Table 3.2-3 Overview of crack detection demonstration using virtual UT system.

項目（時間 min）	概要
事前説明 (10~30)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 模擬試験の目的説明 ・ バーチャル UT の使用方法 ・ 対象となる欠陥とその特徴
模擬探傷 1 (Trial-1) (20+20 延長可)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熟練者=上下流半周 ・ 有資格者=上下流 1/4 周 ・ 無資格者=上下流 1/4 周（長さ測定なし）
中間訓練 (20)	<ul style="list-style-type: none"> ・ バーチャル UT 訓練（フィードバック） 又は 実機サンプル訓練 ・ 検出の勘どころ
模擬探傷 2 (Trial-2) (20)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熟練者=上下流半周 ・ 有資格者=上下流 1/4 周 ・ 無資格者=上下流 1/4 周（長さ測定なし）
アンケート (-)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 感想など ・ 性格分析



Figure 3.2-2 Photo of crack detection demonstration site.

流側の探傷を実施し、欠陥と思われる信号を検出した場合にそれを記録する。

その後に簡単な訓練や指導を、中間訓練として行った。中間訓練では、実際の試験体を用いた訓練、またはバーチャル UT システムを用いた訓練を行った。訓練では探触子の保持や走査速度、走査範囲など、監督者が気付いた点を指導した。どちらの訓練内容とするかは無作為に、ほぼ半々となるように選別した。実際の試験体を用いた訓練では、SCC を導入した実試験体を探傷し、欠陥信号と溶接裏波エコーとの判別方法や注意点を学習させ、バーチャル UT システムを用いた訓練でも同様に判別方法や注意点を学習させた。

その後、再びバーチャル UT システムを用いた模擬探傷 2 を行う。模擬探傷 2 は 20 分の探傷時間とし、延長は認めないこととした。

最後に別室でアンケートの記入を行う。終了後のアンケートでは、本模擬探傷訓練の所感を得ると共に性格分析も行い、どのような人材が検査技術者に適しているかを探ることとした。性格分析としては一般的な Big Five 尺度⁽³⁻¹⁰⁾を採用し、外向性 (Extraversion)、情緒不安定性 (Neuroticism)、開放性 (Openness to experience)、誠実性 (Conscientiousness)、調和性 (Agreeableness) の 5 項目を各々 7 段階で評価する。被験者の負担の軽減と、警戒心を低減させるために基本の 60 項目の質問を 30 項目に減らした。

ここで模擬探傷 1 および 2 では、模擬配管の約 200° の範囲に、(2)で採取した探傷データをセットし、探傷者は指定された範囲を走査し、欠陥と思われる信号 (エコー) を検出した場合に、そのエコー高さ、ビーム路程、探触子位置 (軸方向位置、周方向位置)、指示長さ (DAC100%, DAC20%) を読み上げ、それを記録者 (監督者) が記録する。その際に探傷者から「欠陥ではないと思う」や「形状エコーだと思うが念のため記録」といったコメントがあれば記録する。熟練者は約半周の探傷を実施したが、有資格者は探傷作業に時間がなかったことから 1/4 周とし、さらに無資格者は指示長さの記録を省略した。

3. 2. 2 模擬探傷結果

最初に実施した模擬探傷 1 と、中間訓練を行った後の模擬探傷 2 の結果を、表 3.2-4 に、模擬探傷 1 の結果のグラフを図 3.2-3 に示す。

ここで欠陥検出率 (POD:Probability of Detection) は、指定した探傷範囲に存在する欠陥信号に対し、欠陥であると検出した個数の割合を示す。同じ欠陥部を複数回「欠陥信号である」とした場合でも 1 回として計算している。誤検出率(FCR:False call rate)は、無欠陥

Table 3.2-4 Examination result of crack detection demonstration using virtual UT system.

High skilled engineer and just certified engineer can detect almost defect signal, but just certified engineer made many false call.

Candidate, Training group		POD (%)	FCR(%)	
Trial-1	High skilled	100	5	
	Just certified	94	48	
	Non certified	71	55	
Trial-2	High skilled	VR-UT	100	7
		samples	100	14
		Total	100	11
	Just certified	VR-UT	100	30
		samples	100	41
		Total	100	34
	Non certified	VR-UT	77	34
		Samples	91	29
		Total	83	32

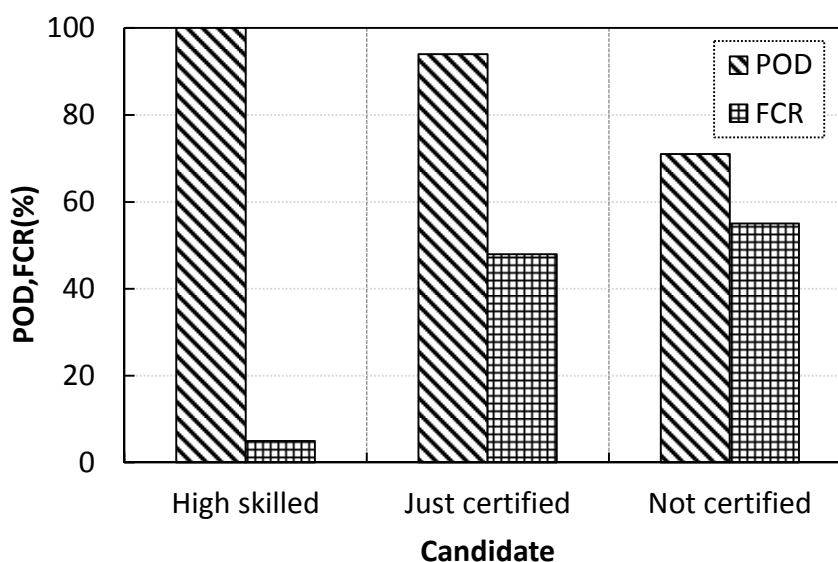


Figure 3.2-3 The first Examination result of crack detection demonstration using virtual UT system. High skilled engineer and just certified engineer can detect almost defect signal, but just certified engineer made many false call.

データの範囲(約 80mm)について、欠陥と判断した信号が記録された場合の割合を示している。つまり、この値が大きい場合は、無欠陥部を正しく無欠陥であると判断できていないことを示す。

ここで示すように、熟練者は付与欠陥信号を全て検出し、かつ無欠陥部をほぼ正確に無欠陥であると判断している。実機探傷を想定すると、欠陥は全て検出し、かつ欠陥ではないが疑わしい部位も検出・報告するが、その数は非常に少なく抑えられており、確認のための他の手法による追加探傷などの措置を行うことも少ない。すなわち熟練者の探傷結果は充分信頼でき、かつ追加のコストも小さいと言える。

これに対して、有資格者の探傷結果は、ほぼ全ての付与欠陥信号は検出しており、特に中間訓練後の 2 回目の試行では全ての欠陥信号を検出している。しかし誤検出率は 48%とかなり高い。このことは、有資格者の場合には、欠陥の検出に関してはそれほど問題ではなく、比較的簡単な指導を行うだけで、熟練者と同様の能力を示すことができる。しかし、検出した欠陥信号の中には、きずではないものが多数含まれており、確認のための他の手法による追加探傷のコストや工程の圧迫などが懸念される。また、欠陥の見逃しではなく誤検出が多いということは、探傷作業時間を延長したとしても誤検出が増えるものと考えられ、探傷時間をかければ有資格者が熟練者と同様の検査ができることになるとは考え難い。

さらに無資格者の場合には、欠陥の見逃しも多く、無欠陥部の判定率も 50%程度であり、探傷結果を信頼できるものではないことと言える。

すなわち、この模擬探傷試験の結果から以下の結論が得られた。

- ① UT 資格を取得している者であれば、欠陥信号を検知することはほぼ可能であり、熟練者でなくとも、簡単な指導で欠陥信号の見逃しは抑えられる。
- ② 欠陥以外の信号と、欠陥の信号を識別する能力において、熟練者と有資格者の差が確認される。
- ③ UT 資格を取得していない者の探傷結果は、欠陥の検出および欠陥でない判断のいずれに関しても信頼は低い。

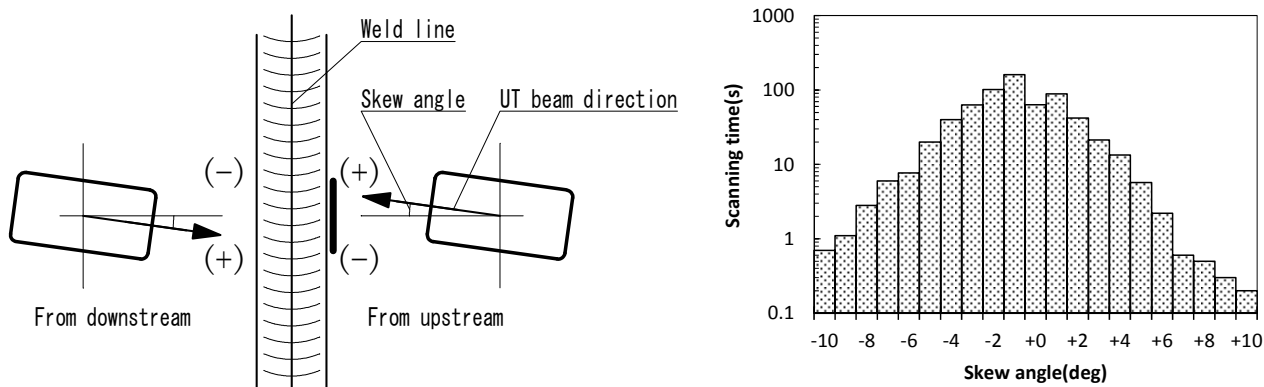
これらのことから、現状の ISI において、「熟練者」ではない資格者が探傷した結果でも、確認探傷や別の熟練者による確認などのコストやスケジュール上の問題があるが、欠陥の見逃しの可能性は低い。「熟練者」が実施した探傷結果は、欠陥の見逃しは非常に少ないと考えられ、かつ確認探傷などの追加作業は必要最低限に抑えられてきていると考えられる。

3. 2. 3 練度による探傷作業の特徴

前項では、熟練者と有資格者の間の主な差は、欠陥信号の判別能力であると推定した。実際の探傷作業における作業手順などに差異がないかを確認する。バーチャル UT システムは第 2 章で示した通りに探傷軌跡などの走査ログを記録する機能があり、その機能を用いて評価を行った。

(1) 探触子首振り角

管内面開口亀裂の検出で用いる斜角探傷法では、きずの長さ方向に対して直交方向に超音波を伝搬させることで、欠陥信号が最大となる。今回の模擬探傷では、配管周方向に長さを有する内面亀裂を対象としているため、配管軸方向に超音波が伝搬するように適切に保持していることが適切な探傷方法である。



(a) Definition of Probe skew angle (b) Typical distribution of skew angle

Figure 3.2-4 Probe skew angle definition and typical distribution.

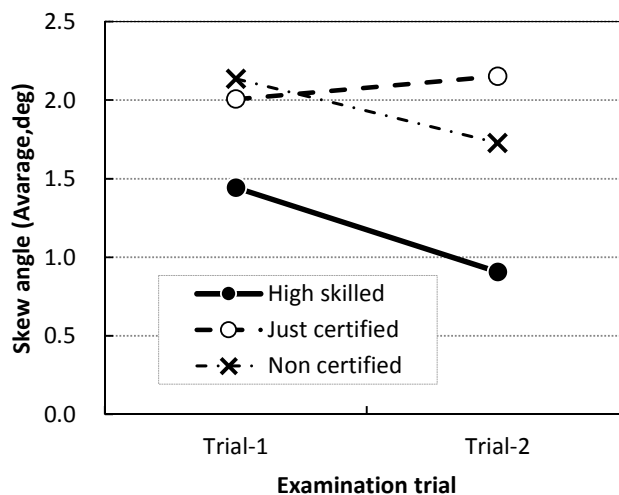


Figure 3.2-5 Average of probe skew angle for each group. The high skilled engineer are able to keep correct skew angle, and just certified engineer can improve in a short time training.

図 3.2-4(a)に首振り角の定義を、図 3.2-4(b)に代表的な探傷者の首振り角分布の例を示す。配管軸方向を首振り角 0° とし、各々時計回り側の角度を正、反時計回りを負の値とし、探傷ログに記録されている、探触子が配管表面に接触している 0.1 秒毎の首振り角を集計した結果である。このように、 0° 近辺の首振り角で主に探傷を行っており、概ね正負均等な分布となっている。

概ね均等な分布となっていることから、 0° を基準とした角度のずれを平均化した値で評価を行った。図 3.2-5 は各被験者グループの首振り角の平均値を模擬探傷 1 と模擬探傷 2 について示したものである。これによると、若干ではあるが、熟練者は探触子を比較的正確に配管軸方向に保持できていることがわかる。比較的簡単な指導を行った後の模擬探傷 2 では、首振り角の偏差が小さくなっていることがわかる。すなわち、有資格者の場合には、通常は配管溶接部の検査などの経験が少なく、一部の被験者は斜角探傷の経験が少ないことから、探触子を適切に配管軸方向に保持することに慣れていない可能性がある。しかし、簡単な指導と数十分程度の練習で改善傾向が見られることから、適切に探触子を保持するよう指導することで、短時間で改善することが期待できる。

この探触子の保持がどの程度の影響を与えるかについて検討する。実際にバーチャル UT システムに設定された欠陥データは概ね配管周方向に配置している。最大エコー高さを示す角度（首振り角）を基準にそこからの探傷角度のずれに対してエコー高さがどの程度低下しているかをまとめたものを図 3.2-6 に示す。横軸に最大エコー高さを記録している首振り角からのずれを、縦軸に最大エコー高さからの低下の程度を示している。実際に使用した 6 個の欠陥信号データ (②⑥⑨⑪⑬⑭) すべての傾向を示した。ここで示すように、 $2\sim 4^\circ$ 程度のずれであれば、2dB 程度の低下となっており、識別性としてはほとんど影響が無いように考えられる。 6° 以上のずれとなると、場合によってはエコー高さが 6dB 程度低下（約半分になる）例もあり、識別性が低下することも考えられる。

これらの観点でも熟練者が概ね 1.5° 程度で計測探触子を保持できていることは適切であり、有資格者などが 2° 程度の首振り角で走査を行っていても識別性には特に影響はないと考えられる。一方で首振り角が 6° 程度ずれているときに欠陥の部位を走査していた場合には識別性が低下する恐れもあることから、適度に保持する訓練が必要であることが判った。

首振り角については、否定するものではなく、欠陥が若干傾いている場合には、適切に探触子の向きを変えて最大エコー高さを検出することが適切である。そのため、欠陥を探す際の首振り角分布と、欠陥を検出した後に最大エコーを探す場合あるいはエコーを記録している際の配管軸方向からのずれを示したデータを図 3.2-7 に示す。走査速度に応じて区分し、 10mm/s を超える速度で走査を行っている場合を"欠陥を探している"状態とし、 $0\sim 10\text{mm/s}$ の速度の範囲であれば、"欠陥を見つけた後に最大エコー高さを探している、あるいはエコーの記録をしている状態"と区分した。各々の探傷状態に応じて、配管軸方向からの偏差を測定し、標準偏差として集計した。

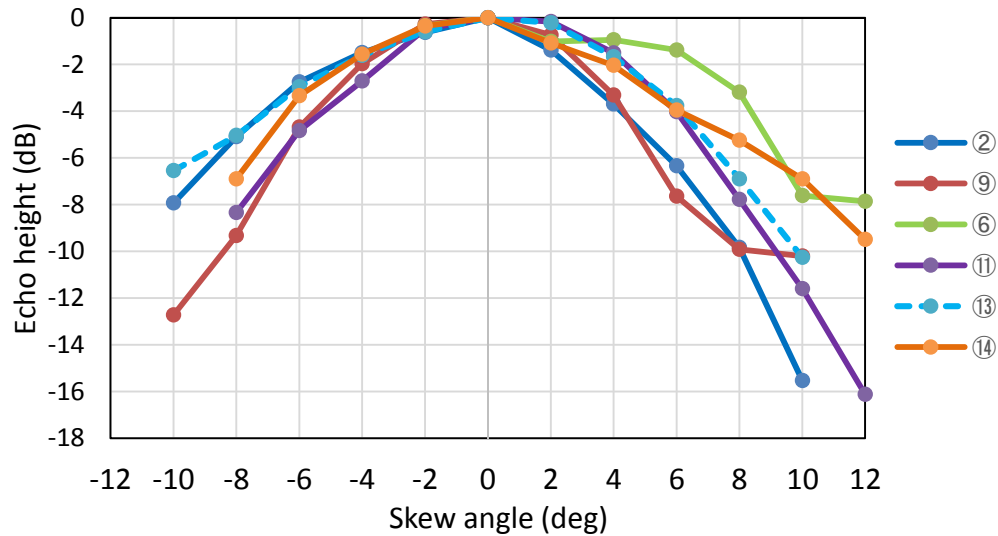


Figure 3.2-6 Echo height distribution depending on skew angle. This shows the skew angle within approximately 4 degrees are not serious effect to echo height.

ここで確認できることは、熟練者も 0° を基準とした偏差としてみると、熟練者も有資格者も同程度に首振り角を適用していることがわかる。また欠陥を探すステップでも、欠陥を検出した後に首振り走査を行って最大エコー高さを検出するステップでも特に首振り角の範囲に大きな差がないことがわかる。すなわち、有資格者であれば、特に首振り走査を気にする必要はなく、ある程度配管軸方向に適切に探触子を保持できることの方が重要であることが判った。

(2) 探触子走査速度

同様の手順で走査速度についても評価を行う。0.1 秒毎に記録されている探触子の位置(周方向、軸方向位置)および配管表面への接触の有無の情報に基づいて、配管表面に接している 0.1 秒の間の走査速度を算出する。

一般的な走査速度の分布を図 3.2-8 に示す。10mm/s 毎の速度範囲別の度数分布を対数表示で示している。速度範囲が 0~10mm/s の範囲は信号を検出し、確認するために少しずつ動かしながら走査している状態や、最大のエコー高さを探するために少しずつ動かしている状態、探触子の位置などを記録している状況と思われる。それ以上の速度での走査は、「きずを探している」状況と考えられる。その部分の速度の分布は対数で概ね直線関係があるように見える。このことから 0~10mm/s の速度範囲を除いた領域について直線で近似した場合の傾きで評価できるものと考えられる。

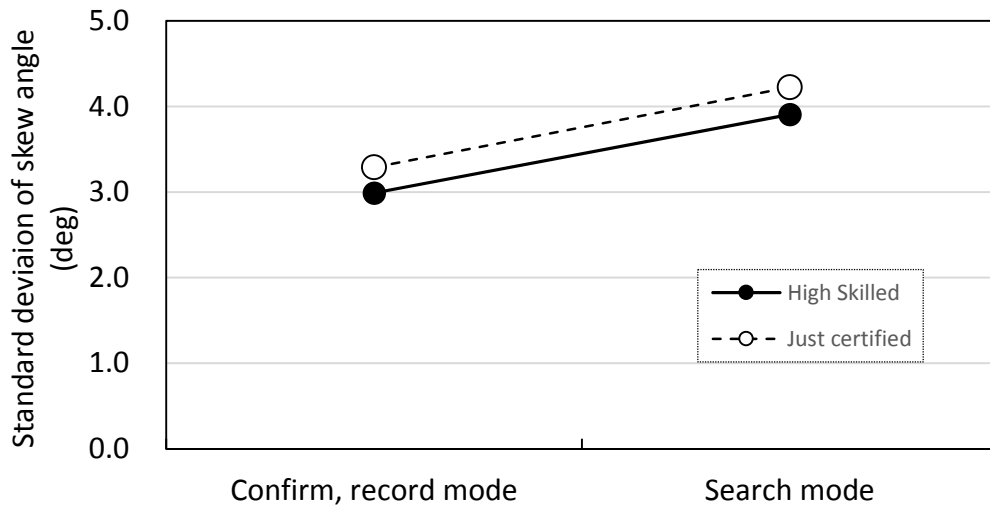


Figure 3.2-7 Skew angle standard deviation for searching step (mode) and confirm and record step (mode). There is no typical difference from high skilled engineer and just certified engineer.

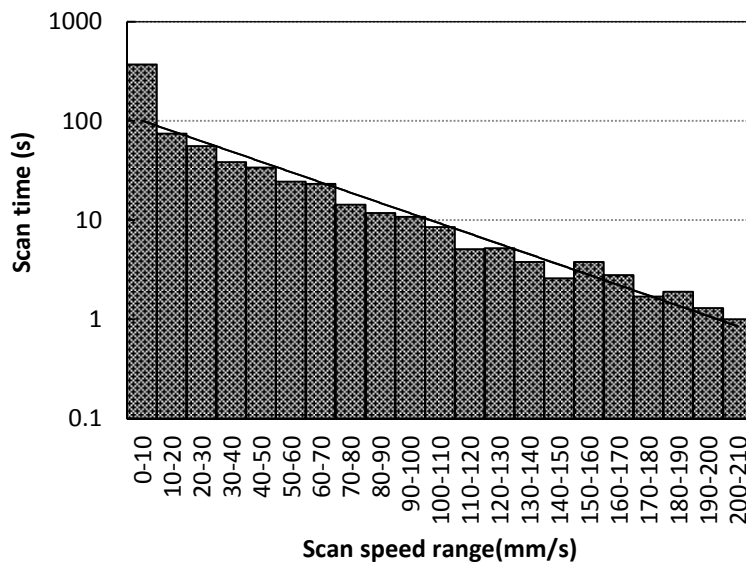


Figure 3.2-8 The typical scan speed distribution. 0-10mm/s shows confirm and record process, the other distribution shows logarithmic linear relationship.

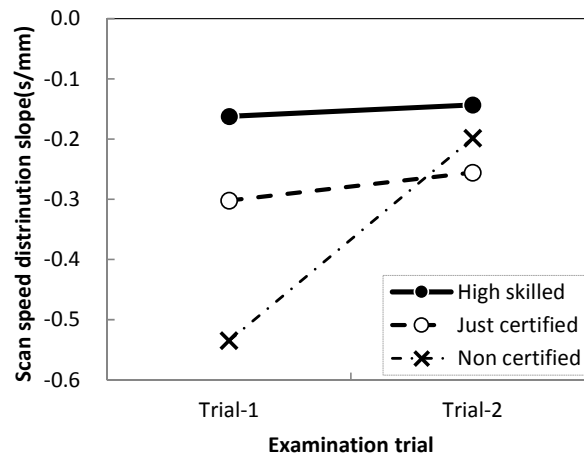


Figure 3.2-9 The average scan speed distribution for each group. The high skilled engineer scans high speed and low speed, the just certified engineer scans lower scan speed.

図 3.2-9 に各被験者グループの走査速度の傾きの平均値を示す。ここで示されるように、熟練者は走査速度の傾きが-0.1~-0.2 の間にあり、速い速度での走査も行っていることがわかる。つまり、速い速度で全体を見渡す探傷を行い、疑わしい部分を比較的ゆっくりとした探傷で確認していくという手順が推定でき、その傾向は実際の探傷作業でも確認された。有資格者はそれよりもややゆっくりとした探傷を行っているものの、速い探傷とゆっくりとした探傷を行っていることがわかる。模擬探傷 1 の無資格者の探傷では、非常にゆっくりとした探傷のみを行っていることが示され、実際の探傷状況でもゆっくりとした探傷を行っている。これは信号の評価方法がわからないことから、信号波形のわずかな変化であっても欠陥信号ではないかと考えてしまうことが挙げられる。模擬探傷 2 の無資格者については、途中の簡易的な指導において「全体を見渡して、他と違う信号が得られるところを探すと良い」と指導したことも影響し、比較的速い探傷で全体を見渡すように努力していることが判った。

これらの結果から、熟練者と有資格者で、探傷速度に大きな違いはないが、熟練者の方が、より速い速度で欠陥部位を探す作業をしており、他と異なる部位を探すことに長けていると考えられる。

(3) 信号強度の記録

欠陥信号（エコー）を検出した場合に、その信号強度（エコー高さ）を記録するが、その信号強度が適切に検出できているかを確認した。欠陥信号の最大値を適切に検出できていることの確認である。バーチャル UT システムを使用しているため、同じ探触子位置および同じ首振り角で模擬探触子を置けば、同じ波形が表示され、予め記録されている波形以上の信号は表示されない。

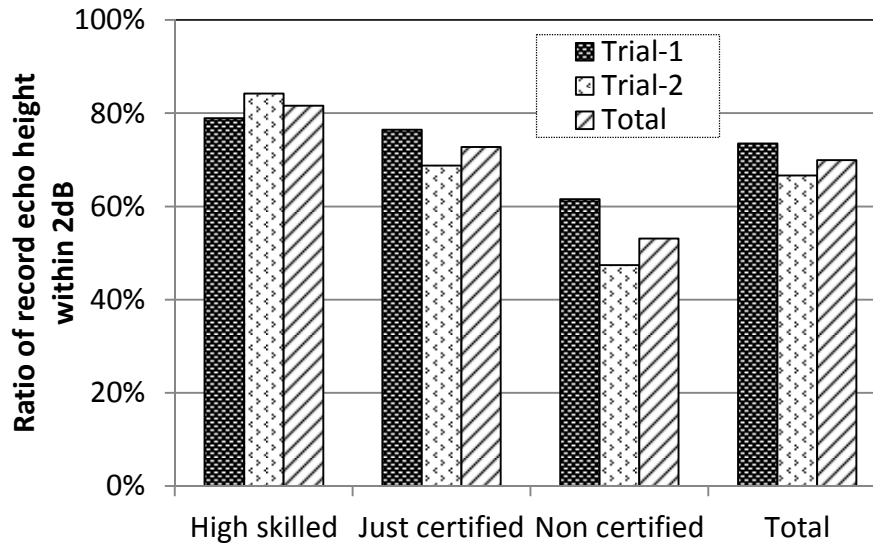


Figure 3.2-10 The reported flaw signal height within 2dB of recorded signal. Even the high skilled engineer report correct echo height 80% of all data.

予め記録された信号の最大値に対し、2dB 以内で計測された比率を示したものが、図 3.2-10 である。ここで 2dB の範囲と定めたことは、ISI に関する規程や、一般的な UT 基準では、感度校正の変動許容幅として 2dB 以内と定めていることによる。すなわち基準となる対比試験片の安定した反射波が得られる状況であっても再現性は 2dB 以内までは許容されると解釈できる。

図に示される通りに、熟練者であっても実際に記録されている信号の最大値を適切に読み取れたと考えられるものは全体の 80%に過ぎない。この値は有資格者もほぼ同程度であり、信号の読み取りにおいては、熟練者と有資格者の能力は大きな差はないものと考えられる。なお、有資格者の場合に、模擬探傷 1 に比べて模擬探傷 2 の場合に適切に読み取れている割合が低下しているが、これは模擬探傷 1 では最大 20 分間の延長を認めたのに対し、模擬探傷 2 は延長を認めていないこととしたため、作業時間のプレッシャーによって、信号の最大値を探す手順が適切に行われなかったものと考えられる。

2dB を超えて計測した事例について、実際に UT でエコーを記録した場合の誤差と比較する。実際の UT で計測されるエコー高さの誤差の例として先行研究⁽³⁻⁶⁾の標準偏差として 3.2dB を基準に集計したものが、図 3.2-11 である。図 3.2-10 と同様に各被験者別に 3.2dB 以内で計測した比率を示している。既述の通りバーチャル UT システムを使用していることから、記録されているエコーが表示されるはずで、実際の探傷よりも測定精度が良いように思えたが、実際に計測されたエコー高さの精度は、実物を使用した精度に近いことがわかる。このことは、実物のエコー高さの測定精度は、バーチャル UT システムを用いて評価することも可能であること、その精度は探触子の接触良否などではなく、エコーの最大値を見つけることができていることによるものと考えられる。

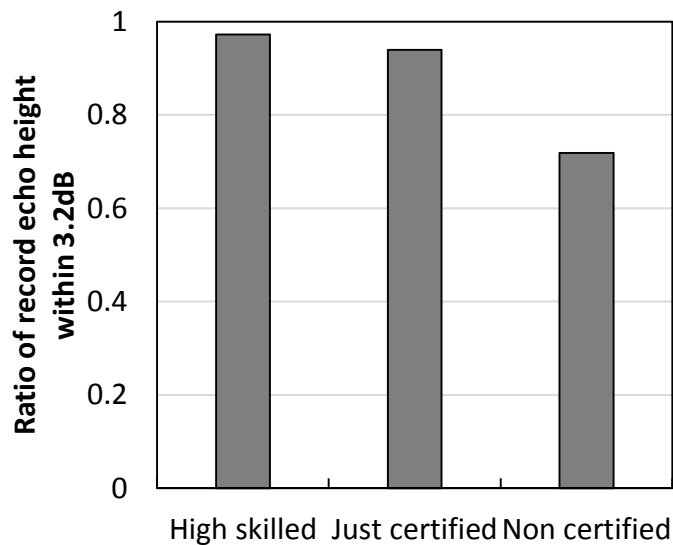


Figure 3.2-11 The reported flaw signal height within 3.2dB of recorded signal. The high skilled engineer could report correct echo height.

3. 2. 4 熟練の試験技術者の検査能力

これまでの検討で、ISIにおける熟練した UT 試験技術者の検査能力とは、以下であると考えられる。

(1) 欠陥検出能力

(a) 欠陥信号の検出

比較的明瞭な信号については、概ね 100%検出可能である。これは、ISI 経験のない有資格者もほぼ同様であり、比較的短時間の指導で、熟練者と同様の能力に達することができる。

(b) 信号の判別能力

欠陥以外の信号を欠陥ではないと判断できるだけの知識と経験を有し、無欠陥部は 90%以上の確率で適切に判断できている。これは ISI 経験のない有資格者には難しく、短時間の指導では達成できない。

(2) 探傷作業の特徴

(a) 探触子の保持

想定される欠陥に対し、適切に探触子を保持することができている。ISI 経験のない有資格者の場合には、比較的短時間の指導で熟練者と同様の能力に達することができる。

(b) 探触子の走査速度

対象部の全体を見渡して、特異部分を検出することができ、効率的な欠陥検出が可能である。これは上記(1)(b)とも関連しており、走査速度が早ければよいものではない

が、特異部を抽出するためには必要な技法である。この作業は比較的短時間の指導で達成可能であるが、信号の判別能力とも関連する。

(c) 信号強度の記録

欠陥信号を記録する技量については、熟練者であっても適切に記録できていないことも多い。この能力は ISI 経験のない有資格者も同程度である。一方で信号強度によらず欠陥を検出していることから、(1)(b)の能力に秀でていることを示している。

熟練者は上記のような特徴があることが明らかであることから、期待される"熟練者"の検査能力は以下の通りである。

- (a) 適度な欠陥信号が得られる欠陥については、概ね 100%で検出可能である。
- (b) 欠陥以外の信号を欠陥と誤判断する確率は、概ね 10%以下である。
- (c) 詳細な記録を要しない大まかな探傷は、350A 配管では 1 時間以内で可能である。
(20 分間で約半周の探傷を実施しており、作業姿勢等を考慮しても 1 時間以内で可能)
- (d) 記録される信号強度は検査能力とは関連しない。

3. 3 実機における試験技術者の検査能力

前項では、バーチャル UT システムを用いて、熟練者と有資格者、無資格者の各々の検査能力の差を明らかにした。本項では実際の ISI 現場や実際の探傷作業における試験技術者の検査能力について検討を行う。

3. 3. 1 実機探傷事例の調査

実際に軽水炉のステンレス鋼配管溶接部に発生した応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) を多数検出した事例について、整理した結果が報告されている⁽³⁻¹¹⁾。当該の報告は実機事例であり、欠陥の見逃しがあつたかどうかについての確認はできないが、実際の環境での検出事例および、欠陥以外の信号の事例についてのデータが示されている。

データの概要を表 3.3-1 に示す。検出された欠陥 (SCC) 数は、126 継手で 181 個であり、そのうち 98 個については切断調査によって実際の深さなどが調査されている。他の 83 個は SCC を残した補修が工法上できなかつたものや、SCC 部分を削る処置を行ったもので、実際の深さなどが確認されていない。検出された最小の SCC は深さ 1.0mm であり、前述の UTS⁽³⁻⁶⁾の報告とも概ね合致している。また当該報告では、切断調査の結果で SCC ではないことが確認されたが、SCC と類似した信号が検出された事例を紹介すると共に、SCC と間違いやすい信号の事例として、ステンレス配管溶接部の裏波エコーの調査も報告されている。実機の 2 プラント 133 継手について、供用前検査 (Pre-service inspection) として実施した超音波探傷試験で得られた、溶接裏波エコーの反射源位置とエコー高さが報告されている。

Table 3.3-1 Overview of stainless steel piping UT detection data on actual plant.

Item	Detail	Comment
SCC 検出事例		
検出継手数	126 継手	
検出 SCC 数	181 個	
調査済 SCC 数	98 個	83 個は補修等に伴い SCC の調査ができなかったもの
調査済 SCC 深さ	1.0mm~14.8mm	
調査済 SCC エコー高さ	DAC 57%~738%	
裏波エコー事例		
対象継手数	133 継手	2 プラント
裏波エコー高さ	DAC 40%~164%	

3. 3. 2 欠陥深さに応じた検出性推定

ここで、切断調査によって、実際の欠陥深さが確認された SCC の検出事例を基に欠陥検出確率 (POD) を推定する。観測される信号 (エコー) は、欠陥深さに応じて定まるものと仮定する。実際には、欠陥長さや傾き、欠陥種別 (SCC か疲労亀裂か) など複数の要素が関連するが、ここでは対象を同じようなメカニズムで発生する SCC を対象としていることから、欠陥種別は同じであり、亀裂深さに応じて亀裂長さも同様に進展していくものとする。

実機で検出された SCC のエコー高さとの関係を図 3.3-1 に示す。ここで示すように SCC 深さとエコー高さの間に明確な相関は確認されていないが、概ね 3mm 程度の深さからエコー高さが飽和していく傾向がみられる。しかし、前項で示したように記録されたエコー高さは熟練者であっても誤差が含まれていることがわかっている。その上で、UTS⁽³⁻⁶⁾においては深さ 3.2mm 以上の亀裂については、概ね検出率が 100%になっていることから、深さ 3.2mm 以上ではエコー高さが飽和し、それ以下は直線的にエコー高さが変化するものと仮定することができる。また 3.3.3 項の検討でも実機で深さ 3.2mm 以上の SCC については、欠陥深さによるエコー高さの影響が飽和する傾向が見られることから妥当と考えられる。この考え方にに基づき、最小自乗近似で求めた直線を図 3.3-1 の図中に示す。ばらつきは大きいものの傾向としては概ね合致しているように見える。

推定直線とエコー高さの標準偏差を計算したものが、表 3.3-2 である。SCC 深さ 1.0mm~3.2mm の間と、3.2mm 以上、全体の統計値を示している。深さ 1.0mm~3.2mm の場合は、標準偏差が大きくなっているが、これはデータ数が比較的少ないことが要因と考えられるが、その標準偏差は UTS で得られた、ステンレス鋼 SCC の手動探傷の場合の欠陥別の標準偏差の最大値(3.2dB)と同程度であり、近似が概ね妥当であることを示唆している。

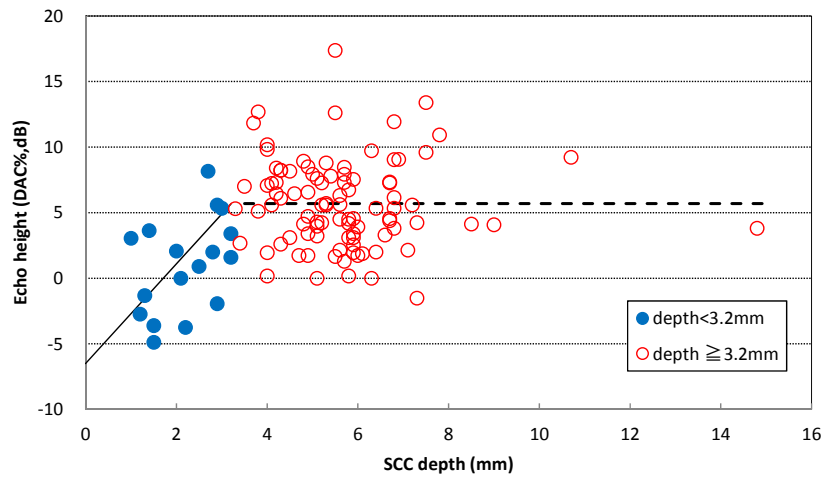


Figure 3.3-1 Actual detected SCC depth and echo height. The crack depth under 3.2mm has linear relationship with echo height, and the crack depth over 3.2mm saturated the echo height.

Table 3.3-2 Standard deviation of signal height and linear fitting based on crack depth.

Crack depth(mm)	Standard deviation from fitting curve(mm)
1.0 - 3.2	3.19
3.2 <	1.58
1.0 <	1.91

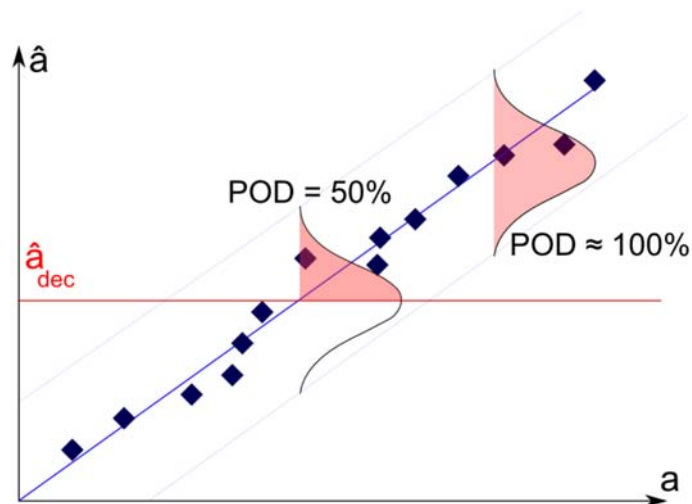
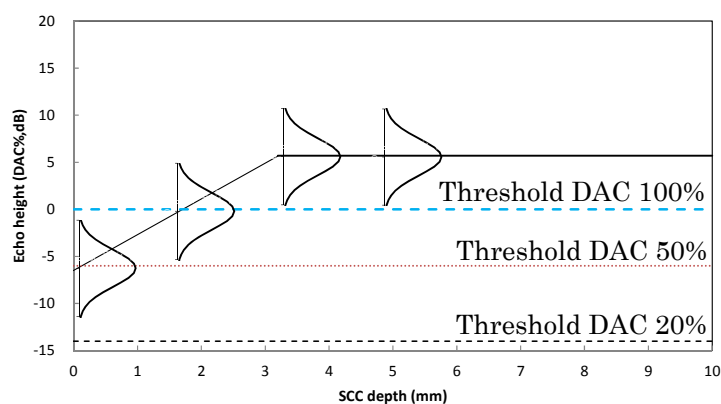


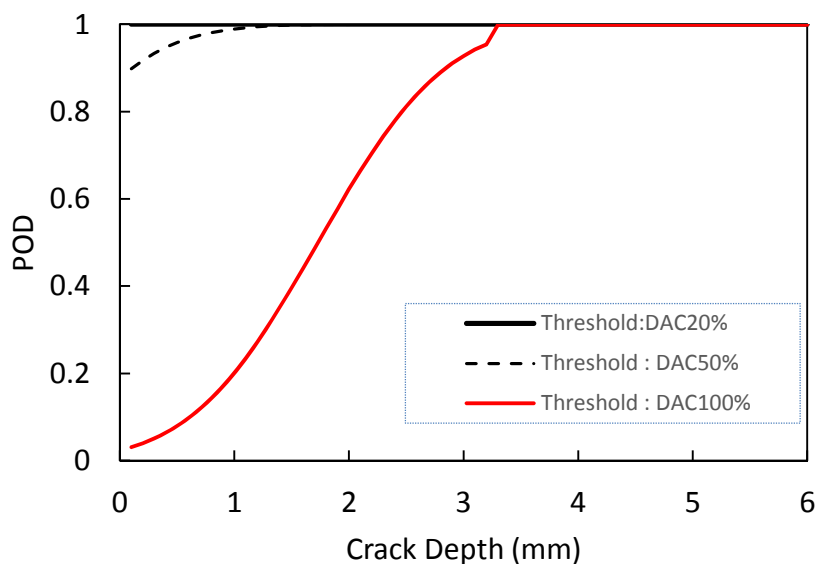
Figure 3.3-2 Conceptual drawing of POD calculation based on signal strength and threshold ⁽³⁻¹²⁾

主に欧州で POD の考え方として適用されている手法⁽³⁻¹²⁾に基づき、POD の評価を試みる。実際の検出対象の寸法などを a (この場合は、欠陥深さ) とし、実際に観測される値 \hat{a} (この場合はエコー高さ) との関係性を推定する。その関係式と実際に観測される値との間の標準偏差を計算する。そこで観測されるデータのばらつきが、しきい値 (観測上のしきい値、あるいは周辺のノイズ) を超えている範囲が、POD となると考える (図 3.3-2)。

この手順に従ってステンレス鋼配管溶接部の SCC の場合を推定する。これまでの検討で、深さ 1.0mm~3.2mm の間はエコー高さ) と欠陥深さ (a) の関係は直線近似され、深さ 3.2mm を超えると、一定のエコー高さとなる。それぞれの観測されるエコー高さは標準偏差を含んでいる。これを図に示したものが図 3.3-3(a)である。深さ 1.0mm~3.2mm の範囲



(a) Echo height and standard deviation for SCC on stainless steel piping



(b) Estimated POD curve based on signal strength

Figure 3.3-3 Estimated POD curve based on signal strength and detection threshold. It is hard to say this curve describe actual POD curve.

はエコー高さの平均値が直線的に変化し、そのエコー高さは全体に対する標準偏差(1.91dB)を持つ正規分布を示し、深さ 3.2mm を超える範囲は、エコー高さは 5.7dB の一定値となるが、同様に 1.91dB の標準偏差を持つ正規分布で観測される。その観測されるエコー高さを、それぞれのしきい値を超える比率を POD と考え、それを示したものが図 3.3-3(b)となる。しきい値は、通常の ISI の DAC20%(-14dB)に加え、DAC50%(-6dB)、DAC100%(0dB)とした。

図 3.3-3(b)で示す通りに、図中の黒色の実線は、ISI のエコー高さを記録するしきい値である DAC20%の場合の POD 曲線である。図中の実線は欠陥深さがほぼ 0mm となっても POD が 1.0 となるなど、実際を示しているとは言い難い。しきい値で DAC50%を示す点線の POD も非常に浅い欠陥でも POD が 1.0 近辺にある。しきい値を 100%とした場合の赤線の場合が、現実に近い POD 曲線と思われる。概ね深さ 1.0mm 未満の SCC は POD がほぼ 0 となり、深さ 3.2mm 近辺で概ね POD が 1.0 となる。欠陥深さとエコー高さの近似直線が深さ 3.2mm の位置で切り替わるため、POD 曲線も深さ 3.2mm の部分で不連続に切り替わるが、概ね実際の POD に近いものと考えられる。実際の ISI での記録レベルである DAC20%では実際の POD を再現することはできていない。

このことは欠陥の検出性は、欠陥信号を認識できるかどうか、すなわちしきい値を超える信号を検知できるかが POD を決定しているものではないことを示している。また、欠陥以外のノイズ（電気ノイズや、金属組織によるノイズなど一定のレベルで存在しているノイズ）との判別においても、エコー高さだけで決定しているわけではないことを示している。すなわち ISI の UT における POD は欠陥信号の強度だけに依存しているものではなく、3.2 項の結論で得られたように、欠陥以外の信号と欠陥信号の判別に依存していることがこの検討でも明らかになった。

3. 3. 3 欠陥信号の検出性についての検討

上記 3.3.2 項で示したように、欠陥信号強度のみの検出性で論じた場合では、その検出性は過去の検出性研究や実際の検出結果と異なる結果を示している。また 3.2 項の結論でも信号の検出は有資格者であれば可能であり、欠陥以外の信号についての弁別が熟練者の特徴であるとすれば、欠陥以外の信号との弁別が焦点となる。

改めて、欠陥信号と欠陥以外の信号とを判別するポイントをまとめる。表 3.3-3 および図 3.3-4 に示す通りに、エコー高さ（信号強度）の他に観測される反射源位置（Y 位置）などが判別のポイントとなっている。エコー高さにも大きな誤差が含まれているが、反射源位置（Y 位置）も観測される値に大きな誤差が含まれている。これは実機配管では、溶接中心位置の罫書線（Y=0）にも誤差があり、さらに配管外表面も溶接によって変形しており、さらに計測される y 距離や w, θ についても誤差が含まれている。特に実機では y 距離を計測する際には、不自然な体制でスケールを用いて試験技術者が読み取ることから、数 mm の

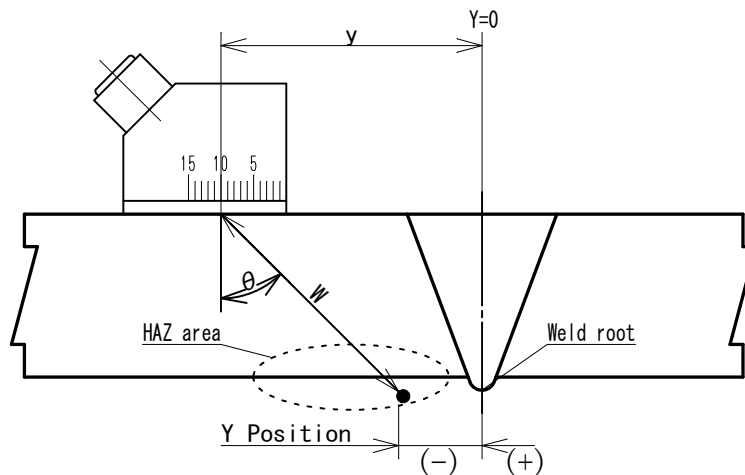


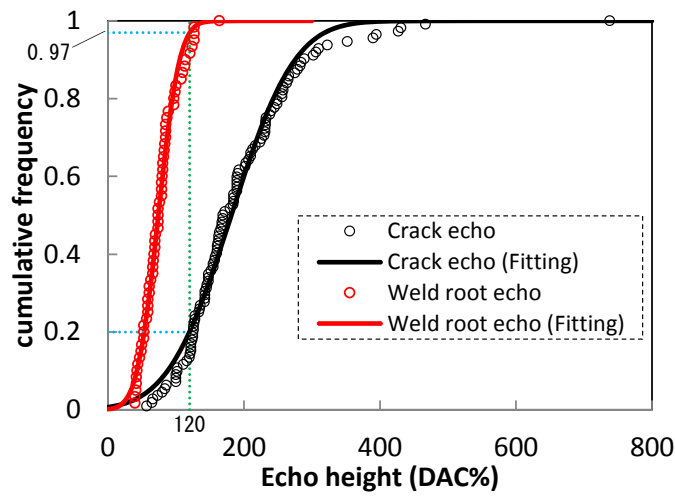
Figure 3.3-4 UT Angled beam technique.

Table 3.3-3 Echo discrimination points. The major information used for echo discrimination are echo height and reflection position.

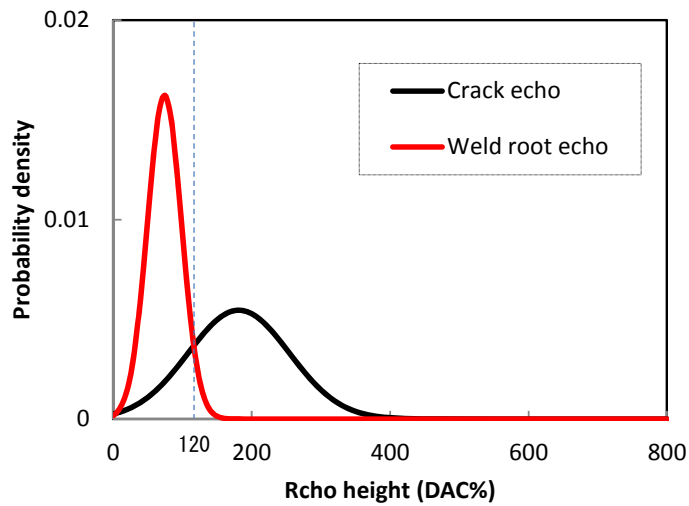
Point of interest	Threshold	Judgment
Echo height	<DAC20%	Reject
	DAC20-100%	Possibility of shallow crack
	>DAC100%	Possibility of crack
Reflection position (Y position)	Clearly HAZ	Crack
	Middle	Possibility of crack
	Clearly weld root	Weld root
Wave form	Sharp	Crack or geometrical
	Jagged	Possibility of SCC
Comparison (Different from)	Another area	Possibility of crack
	The past record	Possibility of crack

誤差が想定される。なおエコーの判別では、他に波形の鋭さや過去の記録や周辺の信号との差異なども挙げられるているが、これらは決定的ではない。周囲や過去と異なる信号が得られる部分は疑わしいとすることは、現場の探傷者ではなく、記録をチェックする評価者の留意点である。また波形の形状による判別は、試験技術者の一部には「波形が SCC のようだ」あるいは「SCC ではなくグラインダきずのような波形」といった表現をする者もいるが、明確にその違いがあることを示したデータはない。

そこで、熟練者のような経験などに基づかなくとも観測可能な要素である、エコー高さと反射源位置 (Y 位置) の 2 要素を基に理想的な信号の判別を、信号検出理論⁽³⁻¹³⁾に基づいて試みた。



(a) Cumulative Frequency for echo height



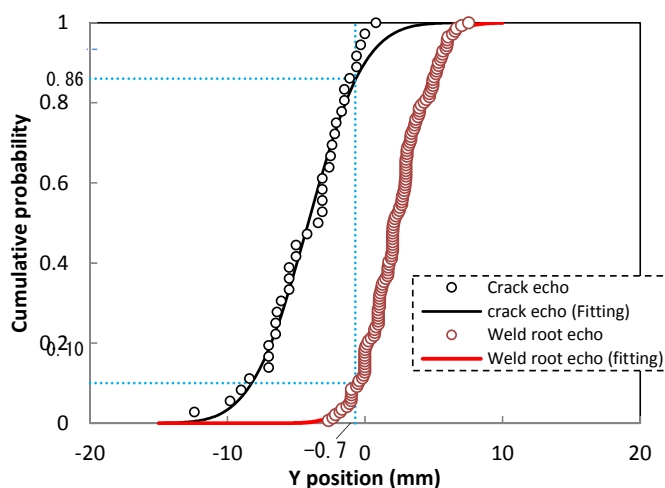
(b) Probability density for echo height

Figure 3.3-5 The distribution of detected crack signal and weld root signal on field. There are some difference in signal (echo height), but not clearly.

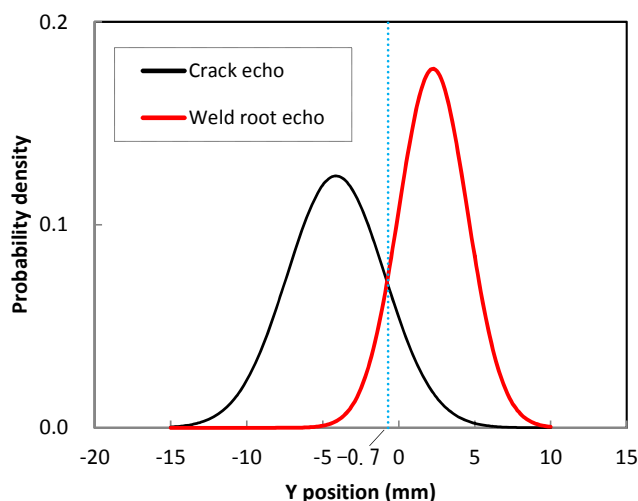
実機で観測され、深さが確認された全ての SCC のエコー高さと、SCC と混同される裏波エコーのエコー高さについての集計結果を図 3.3-5 に示す。図 3.3-5(a)の黒い点は、実機の SCC エコー高さの累積分布を示し、赤い点は裏波エコー高さの累積分布を示している。また各々の実線は、その分布が正規分布に従うとした場合の近似曲線を示す。ここで示されるように各々のエコー高さ分布は概ね正規分布に従っていると考えられる。近似した正規分布を確率密度分布で示したものが図 3.3-5(b)である。黒色実線が SCC エコー高さの確率密度分布、赤色実線が裏波エコー高さの確率密度分布を示す。SCC エコーと裏波エコーを分離するしきい値として DAC120%を設定した場合の例では、誤検出率で $0.03 (= 1.00 - 0.97)$,

SCC エコーを正しく判定する率が 0.80 (=1.00-0.20) 程度となる。この結果は 3.2 節で得られた誤検出率 0.10, 欠陥検出確率 0.98 に及ばない結果となっている。

同様に、実機で観測された SCC の反射源位置 (Y 位置) と、SCC と混同される裏波エコーの反射源位置についての集計結果を図 3.3-6 に示す。図 3.3-6(a)の黒い点は、実機の SCC の反射源位置の累積分布を示し、赤い点は裏波エコーの反射源位置の累積分布を示している。また各々の実線は、その分布が正規分布に従うとした場合の近似曲線を示す。ここで示されるように各々の反射源位置も、は概ね正規分布に従っていると考えられる。近似した正規分布を確率密度分布で示したものが図 3.3-6(b)である。黒色実線が SCC の反射源位置の確率密度分布、赤色実線が裏波エコーの反射源位置の確率密度分布を示す。SCC エコーと



(a) Cumulative frequency for Y position

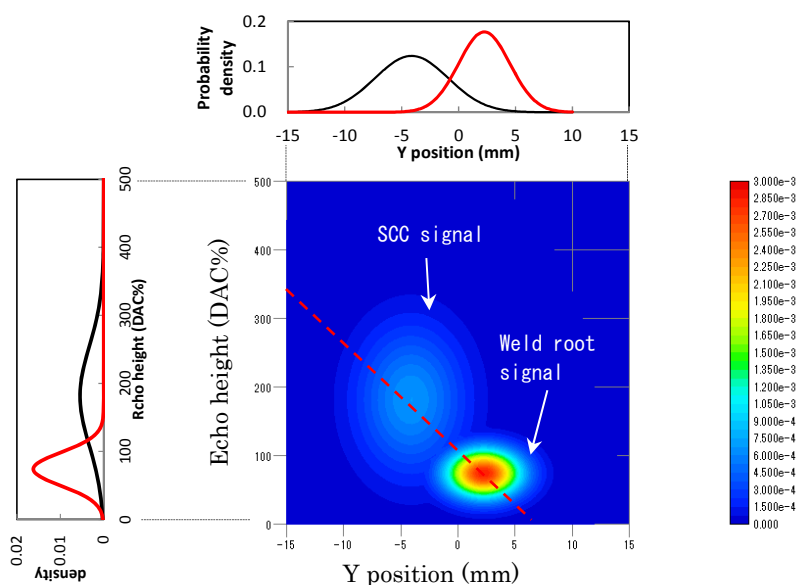


(b) Probability density for Y position

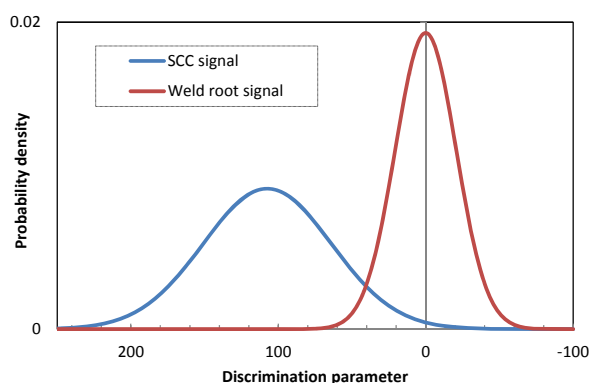
Figure 3.3-6 The distribution of detected crack signal and weld root signal on field. There are some difference in Y position, but not clearly.

裏波エコー分離するしきい値として $Y=-0.7\text{mm}$ を設定した場合の例では、誤検出率で 0.14 ($=1.00-0.86$), SCC エコーを正しく判定する率が 0.90 ($=1.00-0.10$) 程度となる. この結果はエコー高さによる判定と同様に, 3.2 節で得られた誤検出率 0.10, 欠陥検出確率 0.98 に及ばない結果となっている.

これに対し, 各々のエコー高さおよび反射源位置の 2 要素に対する弁別を検討した結果が図 3.3-7 である. 図 3.3-7(a) は Y 位置を横軸に, エコー高さを縦軸に示し, 各々の観測値が正規分布に基づいた場合の確率密度を示すものとして色調表示をしたものである. SCC の信号はエコー高さおよび反射源位置の広がりが多いことから, なだらかな値となっている.



(a) Probability density distribution for echo height and Y position



(b) Probability density distribution on discrimination line (red line)

Figure 3.3-7 Optimization of discrimination parameters as echo height and Y position. It can be discriminate the crack echo and weld root echo based on two dimensional analysis using echo height and Y position with high accuracy.

裏波エコー (weld root signal) については、信号強度も反射源位置も比較的狭い範囲に含まれていることから、小さい範囲にまとまっている。最適な判断のためには、これら2つの信号群の頂点を結ぶ軸で判断をすることである。2つの信号群の頂点を結ぶ線を赤点線で示し、この赤点線上の確率密度分布を示したものが、図 3.3-7(b)である。図 3.3-5 および図 3.3-6 と比較して SCC 信号と裏波エコーの区別がはっきりしてきていることが判る。

図 3.3-7(b)に示した最適な判別線上の確率密度分布を累積密度分布で示したものが図 3.3-8(a)である。同様に SCC の信号と溶接裏波エコーの判別が容易になってきていることが判る。図 3.3-8(a)は判別のパラメータ (図 3.3-7(a)の赤点線上の位置) に応じた欠陥の検出確率 (POD) と誤検出率 (FCR) を示している。判別パラメータの任意の位置の POD と FCR の関係を示したものが図 3.3-8(b)である。これは信号検出理論⁽³⁻¹³⁾で用いられる ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線として知られている。

ROC 曲線は、適切に反応するための能力を示したもので、斜め 45° の線であれば検知能力はなく、左上側に寄った線ほど、適切な能力を有していることを示している。一定の能力を有していた場合に、観測された信号に対して感度 (この場合は POD) を向上させた場合に誤検出 (FCR) が増え、POD を低下させると FCR も低下するという関係を示したものである。図 3.3-8(b)は、欠陥エコーと溶接裏波による欠陥ではないエコーとの識別性を示している。例として誤検出 (FCR) を 0.1 (10%) までを許容すれば、欠陥検出率 (POD) は 0.97 程度とすることができる。この結果は、3.2.2 項で示したバーチャル UT システムを用いた熟練者の探傷結果、すなわち検出率 100%、無欠陥部判定率 95% (誤検出率 5%)に近い結果となっている。一方で有資格者の結果である検出率 94%、無欠陥部判定率 52% (誤検出率 48%)は、この図よりもかなり悪い結果となっている。このことは、

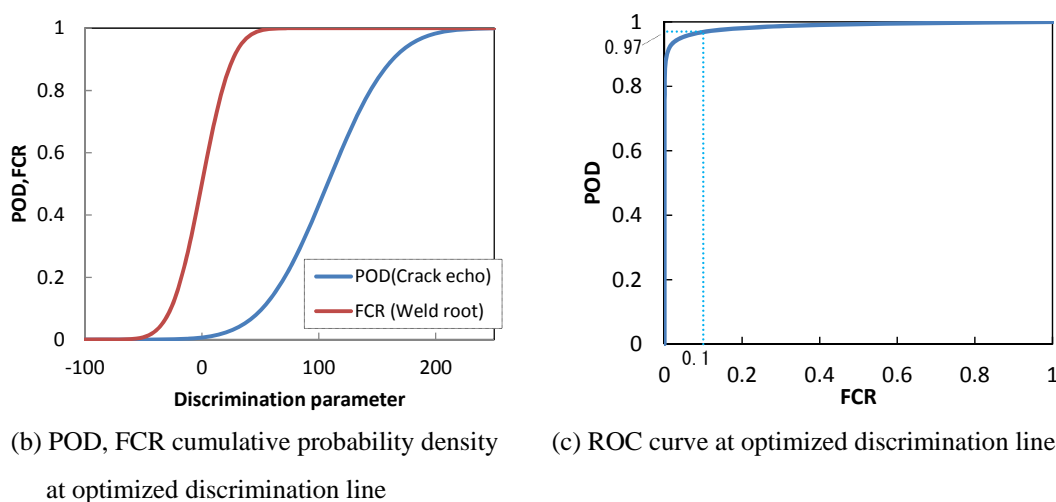


Figure 3.3-8 Optimized discrimination based on echo height and Y position. It can be discriminate the crack echo and weld root echo with high accuracy.

熟練者は特別な技量をもって判断を行っているわけではなく、反射源位置やエコー高さから妥当な判断を行っているものであり、有資格者はその判断のプロセスの理解が不足しているものと考えられる。

3. 3. 4 欠陥検出率の定量的評価に関する検討

3.3.3 項では、欠陥信号と欠陥以外の信号の弁別について評価を行った。しかし、エコー高さは欠陥深さに応じて変化することは 3.3.2 項でも述べられている。そこで欠陥深さに応じた、欠陥の検出能力について検討を行う。

3.3.2 項の検討において、深さ 3.2mm を超える SCC は信号強度(エコー高さ)が飽和し、それ以下については深さに応じてエコー高さが直線的に変化するものと想定された。ここで、改めて実際に検出された SCC 深さとエコー高さの累積確率について計算したものを図 3.3-9 に示す。SCC 深さを 1.0mm から 1.1mm 毎にグループ化し、エコー高さの分布を示したものである。SCC に加えて図 3.3-5(a)で示した裏波エコー分布も赤点線として近似曲線を示した。ここで示すように、溶接裏波エコー (root echo)との判別において、SCC 深さが 1.0~2.0mm の場合にはほとんど判別がつかず、2.1~3.1mm の深さの SCC で多少の判別が可能となり、3.2mm を超える SCC についてはそのエコー高さの累積確率はほとんど変化がないことがわかる。

すなわち、1.0mm 以下の深さでは検出性が極端に低下し、深さ 3.2mm を超える欠陥は、欠陥深さに依存しないものと考えられる。なお各グループでデータ数が少なくなったため、

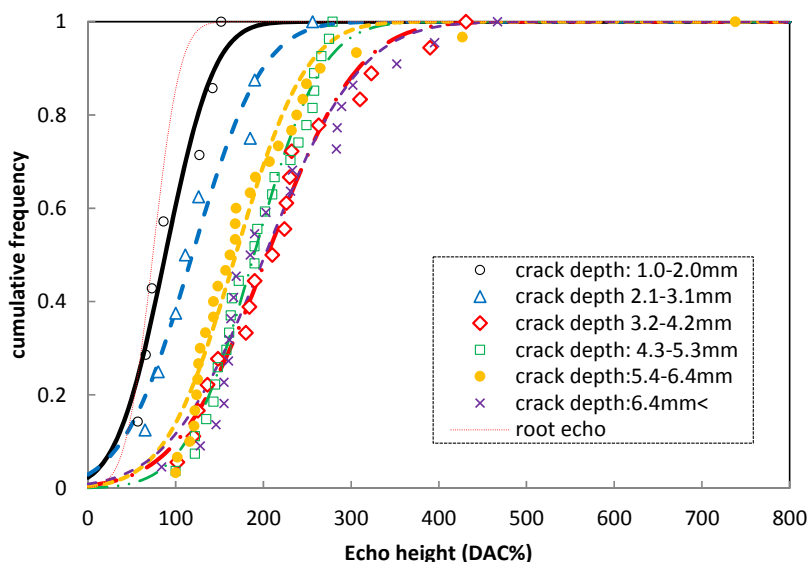
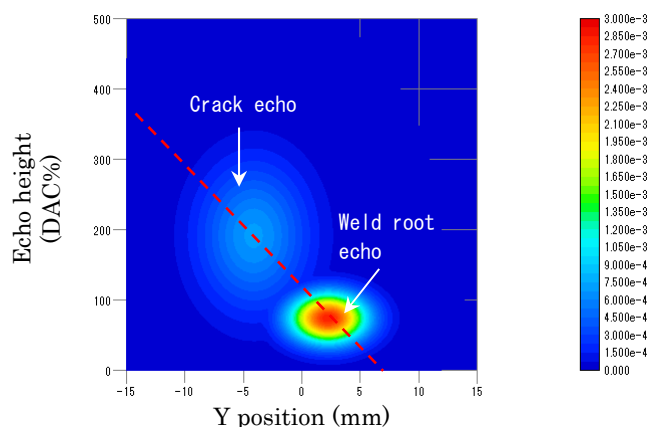


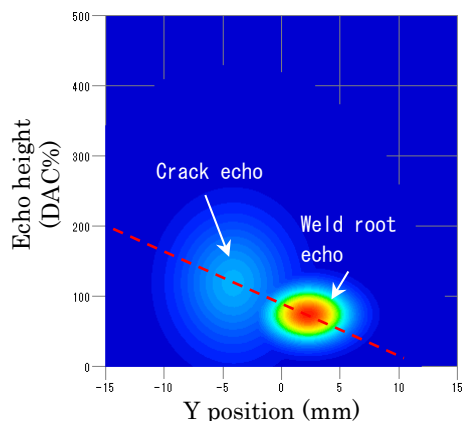
Figure 3.3-9 Crack signal strength distribution depend on crack depth. The signal strength over 3.2mm depth are almost same trends, and signal strength the depth 1.0-2.0mm is almost same as weld root signal.

正規分布からの乖離も一部ではみられるが、概ね正規分布であるとして以降の検討を進める。

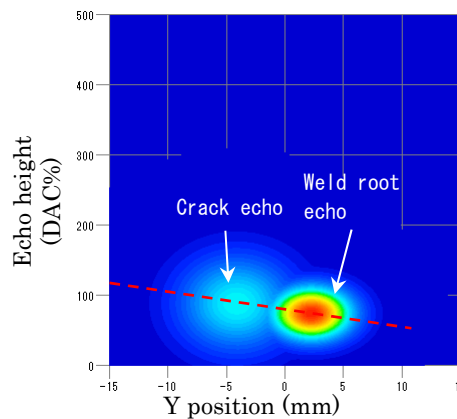
これらの結果を基に 3.3.3 項と同様に、SCC のエコー高さと反射源位置 (Y 位置) の 2 要素に基づく 2 次元の確率密度分布を評価した結果を、図 3.3-10(a)~(c)に示す。図 3.3-7 と同様に、溶接裏波エコーについては Y 位置およびエコー高さはまとまっており、確率密度は比較的高くなっている。また欠陥エコーは反射源位置もエコー高さも広がりがあり、確率



(b) Probability density distribution for echo height and Y position for crack depth $\geq 3.2\text{mm}$



(b) Probability density distribution for echo height and Y position for crack depth 2.1-3.1mm



(c) Probability density distribution for echo height and Y position for crack depth 1.0-2.0mm

Figure 3.3-10 Cumulative Frequency for echo height echo height depends on crack depth. The high accuracy discrimination can be achieved (a) for deep crack, but difficult discriminate for shallow crack(c) by using 2D discrimination combining echo height and Y position.

密度分布は広がっている。これは、欠陥エコーは深さがある程度一定の範囲だとしても欠陥の性状によってエコー高さのばらつきが大きいこと、反射源位置も実際の欠陥が発生する位置が一定ではないことなどによるものと考えられる。

図 3.3-10(a)は深さ 3.2mm を超える SCC の確率密度分布を示している。ここで示されるように深さ 3.2mm 以上の SCC に限定した場合に、裏波エコー(root echo)と欠陥信号の判別はかなり明瞭に可能であることがわかる。図 3.3-10(b)は深さ 2.1~3.1mm の SCC に対する 2 次元の確率密度分布を、図 3.3-10(c)は深さ 1.0~1.1mm の SCC に対する確率密度分布を示している。このように、比較的浅い欠陥については識別性が低下する。図 3.3-9(c)に示すように、1.0mm 程度の浅い欠陥を検出しようとする、ほぼ Y 位置情報に依存することになり、誤検出が多くなる。これは当然ではあるが、深い SCC のみを検出対象とすることで、誤検出を大きく低減することができることを示している。

3.3.3 項および図 3.3-7 と同様に、各々の欠陥深さに対して、ROC 曲線を描いたものを図 3.3-11 に示す。なお図中の点については次節で述べる。青線で示す比較的深い(深さ 3.2mm を超える) SCC については、適切に判断することで、誤検出率 (FCR) を非常に小さく抑えた上で、POD を大きく保つことができる。一方で、3.2mm 以下の比較的浅い SCC の POD を大きく保とうとすると、FCR が大きくなる。特に深さ 1.0mm~2.0mm 程度の比較的浅い SCC を POD=0.95 で検出しようとする、FCR が 0.5 程度となる。FCR を 0.1 程度に留めると POD は 0.8 程度となる。すなわち浅い欠陥の検出率を高く求めることは、誤検出を増加させることを示している。

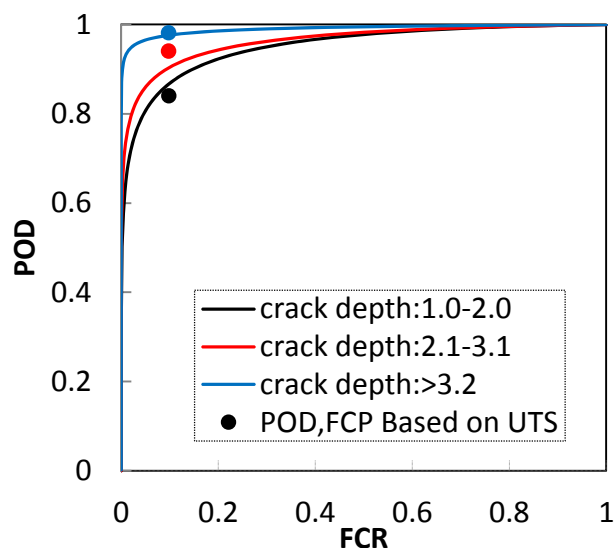


Figure 3.3-11 ROC curve for each crack depth. The experimental FCR and POD is approximately same value with estimated ROC curve based on echo height and Y position.

3. 3. 5 実機で期待される欠陥検出性

前項までで、実機で観測されるエコー高さおよび反射源位置 (Y 位置) の 2 要素で、想定される欠陥検出率 (POD) と誤検出率 (FCR) を推定した。しかし実際の実機探傷データであることから、欠陥が見逃されていたケースの想定ができていない。そこで過去の欠陥検出性実証試験のデータを基に推定を行う。

大規模な欠陥検出性に関する研究が行われた 3.3.1 項でも引用した UTS^(3・6)の結果を用いる。実際に UTS で使用された探傷機材や試験要領については、実機を想定したものであることから、実機模擬と言える。また、試験技術者についても、実機探傷経験のある者を対象としており、実際の検査能力を示しているものと考えられる。なお、以降の検討では確認探傷などを行う前の段階で疑義のある信号かどうかを抽出した結果を基にしている。

UTS におけるステンレス鋼配管の SCC の検出性については、深さ 3.2mm 以上で POD がほぼ 1.0 になるとされている。また深さ 1.0mm 未満の SCC の POD は極端に低下していることも確認されており、これまでの実機での検出事例と概ね一致している。

FCR については、無欠陥領域 450 個に対して誤検出が 44 個 (当初試験の結果、2 次クリーニング波法等による確認探傷実施前) であり、FCR が 0.098 となる。FCR については、3.2.2 項の結果でも示されるように、熟練者の場合には概ね 0.1 程度でもあり、通常の斜角探傷のみで判断する場合の FCR としては、0.1 は妥当な値と考えられる。これらの値を表 3.3-4 に示す。

前述の図 3.3-11 の ROC 曲線に表 3.3-4 の結果をプロットした。ここで示されるように、各々 ROC 曲線に近い結果となっている。このことは、実機で確認された SCC のエコー高さ、Y 位置に基づいて適切に判断した場合の FCR と POD は、大規模な実験で行われた熟練した試験技術者の判断と同程度であることが示されたことである。また、得られた ROC 曲線は、実際の実機の検出性を示していると考えられる。すなわちエコー高さ、Y 位置に基づいた判断すなわち、熟練者と同じレベルの判断を行うことは、特別な技能が必要なわけではなく、適切にエコー高さ、反射源位置 (Y 位置) を記録し、適切な判断レベルでエコーを分類すれば達成できることになる。

Table 3.3-4 POD,FCR on UTS project.

Crack depth (mm)	POD,FCR	
	UTS	Estimated at FCR=0.1 based on ROC curve
1.0~2.0	0.800	0.868
2.1~3.1	0.940	0.904
3.2<	0.981	0.976
FCR	0.098	[0.100]

3. 3. 6 熟練者が実施した場合の検出性

これまでの検討で、ステンレス鋼配管の SCC を対象とした UT 検査で、直接観測でき、かつ欠陥か否かの判断を行うために重要な要素である、エコー高さと反射源位置 (Y 位置) を基に判断を行う場合の検出確率を推定し、そこで明瞭に信号が得られる、深さ 3.2 mm 以上の欠陥については、ほぼ 100%の確率で検出可能であることを示した。

それよりも浅い欠陥については、得られる信号強度と観測される反射源位置を基に適切に判断することで、深さ 2.1~3.1mm では 90%程度、深さ 1.0~2.0mm では 85%程度の POD が期待される。さらに欠陥の誤検出率については 10%程度を維持することができる。

3. 4 結 言

本章の検討では、熟練者の検査能力および探傷作業の特徴を明らかにすると共に、熟練者の目安とされる欠陥検出能力および誤検出率について特定した。これらの結果から、熟練者とされる試験技術者が適切な環境で、適切に判断した場合には、以下の能力を発揮できることを明らかにした。

- (a) 熟練者の技量の特徴は、検出された信号が欠陥か否かを判断する能力が主である。欠陥信号を検知する能力は、熟練者ではない有資格者であっても概ね同等である。この識別は特別な能力によるものではなく、信号強度や反射源位置を適切に判断することで概ね達成可能である。
- (b) 適度な欠陥信号が得られる、深さ 3.2mm 以上の欠陥については、概ね 100%で検出可能であり、それ以上の深さについては信号強度も識別性も大きな差はない。
- (c) 比較的小さい欠陥の欠陥検出についても 1.0mm 以上の深さであれば 80%以上で検出可能である。
- (d) 欠陥以外の信号を欠陥と誤判断する確率は、概ね 10%以下である。
- (e) 詳細な記録を要しない、大まかな探傷は 350A 配管では 1 時間以内で可能である。

(20 分間で約半周の探傷を実施しており、作業姿勢等を考慮しても 1 時間以内で可能) 熟練者の能力が欠陥信号の判別に特徴があることを明らかにしたことから、実機で検出された実際の SCC 事例と、SCC との識別で特に問題となる溶接裏波形状エコーとの識別について、客観的に観測可能な信号強度 (エコー高さ) と反射源位置 (Y 位置) の 2 要素による判定で、どの程度識別可能であるかを検討した。2 要素による判定で適切に判定し、誤検出率 (FCR) 0.1 程度を許容した場合に、深さ 3.2mm 以上の比較的大きな欠陥の欠陥検出率 (POD) は 0.98 程度が達成可能出ることが判った。この結果は熟練者の信号判別能力と同程度であり、熟練者が行っている信号の判別は、特別な能力や検知できないような情報を基にしているものではなく、有資格者であればある程度適切に観測可能な信号強度と反射源位置の情報に従って、適切に判断を行っていることであることが判った。この結果によると、比較的浅い深さ 3.2mm 未満の欠陥の検出率を、高いレベルで要求した場合は、誤検出率 (FCR) が大きくなり、追加の確認探傷などのコストが増大することとなる。

すなわち熟練者の探傷能力と同等の能力とは、比較的大きい深さ 3.2mm 以上の欠陥の検出能力を POD=0.98 程度とし、誤検出率 (FCR) が 0.1 程度であることを明らかにした。また、これを達成するような能力を有していれば、比較的小さい深さ 3.2mm 未満の POD は 0.8~0.9 程度が達成できると考えられる。

3章 参考文献

- (3-1) 一般社団法人 日本機械学会編「発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版)」, JSME S NA1-2012, 2012.
- (3-2) 一般社団法人 日本電気協会編, 「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」, JEAC4207-2016, 2016.
- (3-3) 日本工業規格, 「非破壊試験技術者の資格及び認証」, JIS Z2305:2013, 2013.
- (3-4) American Society for Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Appendix VIII, Performance demonstration for ultrasonic examination systems, 2014.
- (3-5) 東海林一, 「諸外国における検査技量認証制度の状況－現状と課題－」, 保全学 Vol.15 No.4 2017, 2017.
- (3-6) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 「平成 16 年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書 (超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの[総括版]」, 05 基材報-0001(2/2), 2005.
- (3-7) 平澤泰治, 小林輝男, 牧原善次, 南康雄, 「超音波探傷試験技術者に対する教育・訓練の有効性の検討」, 日本保全学会第 13 回学術講演会 要旨集, 横浜, 7 月 25-27 日, pp.13-17, 2016.
- (3-8) 東海林一, 秀耕一郎, 「技量認定試験に使用可能なバーチャル UT システムの試作」, 電力中央研究所 研究報告書, Q14007, 2015.
- (3-9) 東海林一, 「バーチャル UT システムを用いた検査員の技量向上の検討」, 電力中央研究所 研究報告書, Q16012, 2017.
- (3-10) 和田さゆり, 「性格特性用語を用いた Big Five 尺度の作成」, 心理学研究 67, pp61-67, 1996.
- (3-11) 清水敬輔, 設楽親, 小林輝男, 山下理道, 岡田亮兵, 稲垣哲也, 中田親秀, 長松弘幸, 近畑英之, 山本幸司, 枡明彦, 牧原善次, 高津光志, 岩田潔, 東海林一, 「原子炉再循環系配管への超音波探傷試験実施・評価に関するノウハウ」, 保全学, Vol.8, No.4 pp31-36, 2009.
- (3-12) Daniel KANZLER, "TUTORIAL: NDE Reliability for Practitioners Probability of Detection Probabilistic evaluation: Defect size detectability", Procedure of 7th European-American Workshop on Reliability of NDE, Berlin, 2017
- (3-13) Wickens, T. D., "Elementary Signal Detection Theory", ISBN-10: 0195092503, 2001.

第4章 配管の健全性維持に必要な欠陥検出性能

4.1 緒言

発電用原子力プラントでは、運転開始後もその健全性を確認するため、容器や主要配管といった重要な機器については、日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格⁽⁴⁻¹⁾に従った供用期間中検査(ISI: Inservice Inspection)が行われている。原子炉内の流体を循環させる重要配管(クラス1配管)については、溶接部を中心に超音波探傷試験(UT: Ultrasonic Testing)を用いた検査が行われている⁽⁴⁻²⁾。UTを実施する試験技術者は、UTに関する基礎的な知識と技量を有していることを担保する基礎資格⁽⁴⁻³⁾として日本非破壊検査協会によって超音波探傷試験レベル1以上を有していることの他に、ISIに関する経験を有していることが求められている。これはUT結果の信頼性は、UTを実施する試験技術者の能力の影響を受けるためである。

第3章では、ISIにおけるUT熟練者の特徴と、その検査能力を明らかにすると共に、ISI経験のない有資格者の検査能力も評価した。また、欠陥の信号強度(エコー高さ)と、反射源位置(Y位置)の2つのパラメータを基にして、裏波エコー(root echo)と欠陥信号を適切に判別することができれば、熟練者と同程度の誤検出率(FCR: False Call Rate) 0.1以下と、深い欠陥に対する欠陥検出確率(POD: Probability of Detection) 0.98程度を達成できることを示した。これらの結果は、適切にデータを採取・評価さえできれば、熟練者と同レベルの検査能力を発揮できることを示している。

一方で発電プラントの検査を行う観点では、熟練者の検査能力が発電プラントを維持するのに必須な能力とは限らない。例えば、発生初期の非常に小さな欠陥を検出できたとしても、次の点検までに損傷(漏えい)に至らないならば、検査を実施する効果は低い。むしろ、次の点検までに損傷(漏えい)に至る可能性がある大きな欠陥を確実に検出する方が効果は高いといえる。

欠陥検出能力とクラス1配管の確率の関係について、例えば町田らは配管にSCCが発生・進展することを仮定して検討をしている⁽⁴⁻⁴⁾。検討では、配管溶接部に発生したSCCに対し、ある一定の深さでPODが0から1.0に切り替わるステップ状のPOD曲線を想定し、当該継手に対する検査能力と破損確率の関係を求めている。検討の結果、検査を実施することで破損確率を低減できるが、1回の検査(PSI: Pre-service Inspection, 供用前検査)だけでは寿命中の配管の健全性は確保できず、確保するためには定期的に検査をする必要があることを示した。永井ら⁽⁴⁻⁵⁾は、直線状のPODを仮定し、POD直線の傾きが当該継手の破損確率に与える影響を検討している。10年に1回の定期的なISIを実施することで、口径100Aの小口径配管を除いて破損確率を非常に小さい値とすることができ、小口径配管についても適切な値に抑えることができると報告している。以上の検討は欠陥検出能力が配管の漏洩に与える影響を定量的に評価しているものの、後述する実際の発電プラントの検査手順に従っていない評価となっている。また、検査能力としてPODにのみ着目しており、FCRについての考慮はない。

先に述べたとおり発電プラントのクラス 1 配管は日本機械学会の維持規格⁽⁴⁻¹⁾に従って ISI が行われている。配管溶接部の ISI は、継続監視と抜き取り検査の考え方に基づいたものであり、抜き取り対象に選ばれなかった箇所は、検査対象継手で欠陥が検出されなければプラント稼働中に点検されることはない。具体的には、運転開始後 40 年間は 10 年を 1 サイクルとし、1 サイクルで検査対象箇所(溶接継手数)の 25%を検査し、次のサイクルも同一箇所を点検する。1 サイクルの間の点検数は 10 年間の間に概ね均等になるように配分される。ISI で欠陥が検出された場合には、当該の ISI で計画されていた箇所と同数を追加で点検し、追加箇所でも欠陥が検出された場合には全数点検を行う。この手順は、プラントで発生する損傷については、その発生および進展挙動は概ね把握されており、ISI は未知の事象が発生していないかを確認するものとの考え方に基づいている。追加点検は、その欠陥が稀に発生するものなのか、それとも他の部位でも同様に発生するものなのかを把握することを目的としたもので、他の部位でも発生していることが確認できれば、未知の損傷モードが存在することが危惧されることから全数を点検するものである。

本章では、この ISI の考え方に基づいて、検査能力と配管の破損確率(系統としての漏えい確率)の関係を明らかにし、ISI で求められる欠陥検出能力を明らかにする。

4. 2 配管の損傷確率と検査能力

4. 2. 1 想定する損傷の発生と進展

発電用軽水炉は、世界で既に 400 基以上が運転されており⁽⁴⁻⁶⁾日本国内で稼働しているプラントよりも運転期間の長いプラントも多数存在している。新たな損傷モードが確認された場合には、その情報に基づき類似箇所の点検などや、発生を抑える対策工事の施工といった水平展開がとられる。2003 年頃に顕在化した再循環系配管の応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)についても⁽⁴⁻⁷⁾、国内のほぼ全てのプラントで応力改善工事⁽⁴⁻⁸⁾などの対策工法が既に施されていると共に、対策が為されていないプラントについては、通常の ISI よりも高い頻度で、全継手の点検がされている⁽⁴⁻⁹⁾。

一般的にプラントの配管系で懸念される損傷は以下のとおりであるが、原子力プラントでは次のような対策が施されている。

- ・機械疲労：振動および起動停止、地震動などを設計段階から考慮している。
- ・熱疲労：発生が懸念される箇所を特定し、個別に確認している。
- ・配管減肉：懸念される箇所を推定する技術を開発し⁽⁴⁻¹⁰⁾、該当箇所については肉厚計測⁽⁴⁻¹¹⁾により確認している
- ・SCC：ほぼ全てのプラントで応力改善工事などの対策工法が施されている

上述したとおり、原子力発電プラントでは懸念される損傷モードに対して既に対策が施されているが、本研究では SCC が配管溶接部で発生・進展すると仮定して検討を行う。

4. 2. 2 欠陥検出確率の設定

POD は一般的に UT による亀裂状の欠陥に対する値として、そのきず深さに応じた値として示される。1.2 節で示したように、原子力安全基盤機構の実施した研究では、ステンレス鋼配管溶接部に発生した応力腐食割れ(SCC)の場合には、概ね深さ 3.2mm 以上のきずについては全て検出可能であり、それ以下の場合に POD が低下し、概ね深さ 1mm 程度が検出限度となっている。POD を示す曲線も複数提案されているが、実際にそのパラメータを変化させた際に POD 曲線がどのように変化するかがわかりにくい。POD 曲線の評価を行う上では、"検出限界"(それ以上小さな欠陥は検出できない欠陥深さ)や、概ね 100%の POD となる深さ、といったわかりやすいポイントで議論することが、理解を深めることとなる。

これらをふまえて、本検討では図 4.2-1 および式 (4.2-1) に示すような簡易な POD を仮定した。この仮定では、検出可能なきず深さの最小値 (a_0) 以下の深さのきずの POD は 0 となる。また、きずの深さがある一定値 (a_1) 以上になると POD は 100%に近づき、 m になるとした。 a_0 と a_1 の間の POD はきず深さとともに線形的に変化するものとした。ここで、 a_0 については、既往研究⁽⁴⁻¹²⁾で、概ね 1.0mm 以下の欠陥は POD が 0 となっていることから、 a_0 は 1.0 に固定した。ここで、欠陥検出性が確認され、適切な運用がされている手順書や機材を使用する前提であれば、大きな欠陥に対する POD は 100%になるはずである。しかし、本検討は試験技術者の技量確認を目的としていることもあり、POD=100%を確認することは非常に困難である。このため確認可能な POD をどこまで引き下げることができるかを検討するために、 m が 1.0 ではない前提で計算を行う。

その上で、この簡易式に基づき a_1 と m がどの程度悪化した場合に、プラントの健全性が影響を受けるかの検討を行うことで、検査能力に関する議論を簡略化する。

$$POD(x) = 0[x < a_0]$$

$$POD(x) = \frac{\varepsilon}{(a_1 - a_0)}(x - a_0)[a_0 < x < a_1] \quad (4.2-1)$$

$$POD(x) = m[x > a_1]$$

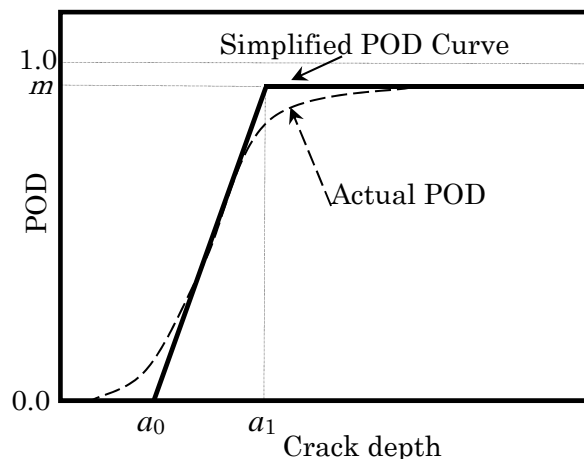


Figure 4.2-1 Simplified POD Curve.

4. 2. 3 亀裂進展評価

想定する亀裂の発生および進展評価の計算について仮定する。

(1) 亀裂の発生

本検討における SCC の発生は、本来の微視的な亀裂の発生ではなく、UT で検出可能な大きさの SCC が突然発生すると仮定する。SCC は配管の内表面で確率的に発生し、内表面における残留応力と材質などの条件が同程度であれば、同等の確率で発生するものとする。すなわち溶接残留応力や表面硬化の程度などにも依存するが、単位溶接線長さに対して発生確率は一定であると考えられる。

実際のプラントの点検結果についてまとめた報告⁽⁴⁻⁷⁾を基に検討を行う。実際の点検総数および対象口径、個々の継手の運転期間の詳細は報告書内で明らかにされていないが、報告時点で稼働していた類似の系統を有する 27 基に対して全数点検が行われていたことから、各々表 4.2-1 の継手を有しているプラントの点検結果と推定できる。各対象部の運転期間の推定は、定期検査や途中の改造等もあり難しいが、各プラントの運転開始年から主に点検の行われた 2007 年までの平均経過期間が 23.1 年であることから⁽⁴⁻¹³⁾、平均して 20 年間の運転実績であったと推定できる。これらの点検で 181 個の IGSCC が検出されていることから、単位時間・単位溶接線長あたりの発生率を計算したところ $1.2 \times 10^{-13} [(\text{mm} \cdot \text{s})^{-1}]$ となった (表 4.2-1)。なお、ここで示す通りに、口径毎に発生率は異なるが、溶接線長あたりで計算すると、発生率は概ね同程度となることから、本仮定に大きな間違いはないものと考えられる。

本検討では、表 4.2-1 に示した口径の配管に対して検討することとし、亀裂は表内の単位時間・単位溶接線長あたりの発生率によって運転期間に応じてランダムに亀裂が発生するものとする。ここで発生とは先に述べたとおり微視的な亀裂発生ではなく、UT で検出可能な最も小さな深さ (a_0) を持つ亀裂が発生確率に従ってランダムに発生するものとする。

Table 4.2-1 Statistics of detected SCC and calculated initiation probability.

Pipe Nominal Diameter	Thickness (mm)	OD (mm)	Circ. Length (mm)	No. of Joint (1 loop)	No. of detected SCC	Freq. (/joint) *1	Freq. (/length) (/mm)
600A	39	625	1963	24	89	69×10^{-3}	35×10^{-6}
400A	26	416	1307	12	23	35×10^{-3}	27×10^{-6}
300A	21	326	1024	20	10	9×10^{-3}	9×10^{-6}
150A(*2)	14	165	519	6 *2	2	3×10^{-3}	12×10^{-6}

*1 : Calculate as 27 plants at the inspection period

*2 : Including 200A data

(2) 亀裂の進展

本検討では SCC を想定しているが、進展速度については以下の 2 ケースについて検討する。

一つ目のケースでは初期の軽水炉で発生が確認された鋭敏化ステンレス鋼(以下 鋭敏化 SUS304)の SCC 進展速度を仮定する。鋭敏化 SUS304 の進展速度は、維持規格⁽⁴⁻¹⁾で定められているものを用いた。この進展速度線図は過去のデータを包含するような上限包絡で決められていることから、実際の平均的な進展速度よりも保守側(過大評価側)の値となっているものと考えられる。

二つ目のケースでは、現行のプラントで主に用いられている低炭素ステンレス鋼(SUS316 等)で、2003 年頃に確認された SCC の速度を仮定する。対象継手部は、応力改善等を行われていない継手とし、健全性評価では、保守的に評価するために、溶接熱影響部では鋭敏化ステンレス鋼の進展速度を、溶接金属に進展した後は低炭素ステンレス鋼の進展速度を設定するものとする⁽⁴⁻⁹⁾。

溶接部の残留応力については、健全性評価では 600 A および 300 A の残留応力分布を 3 次式で近似したものを用い、400 A および 150 A については 300 A の残留応力分布と同じ分布として、板厚に合わせて伸縮させて使用した(図 4.2-2)。内圧による膜応力は、600A は 42.1MPa, 400A は 41.7MPa, 300A と 150A は 40.3MPa とし、曲げ応力は考慮していない。これらの進展速度や残留応力分布は保守的な値を十分有しているものとして、ばらつきは考慮していない。

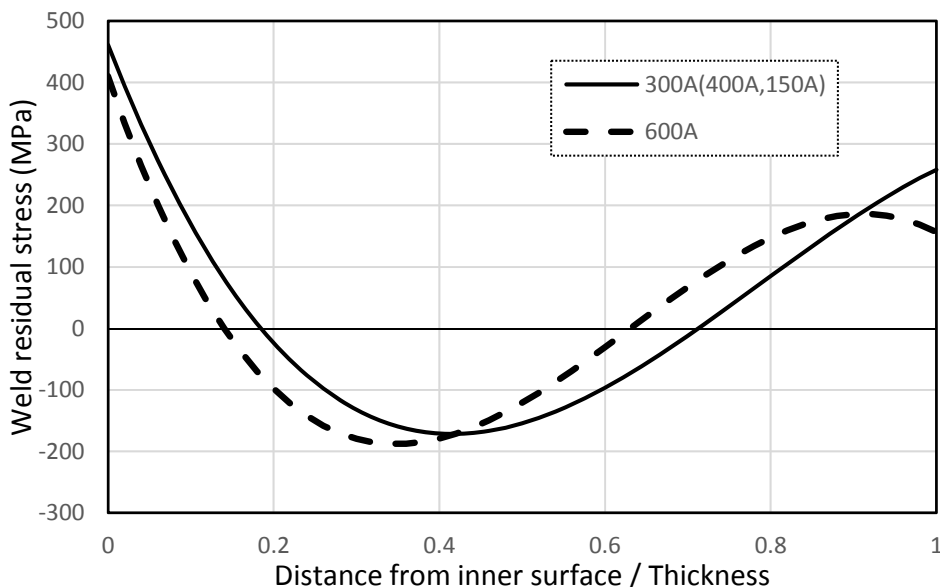
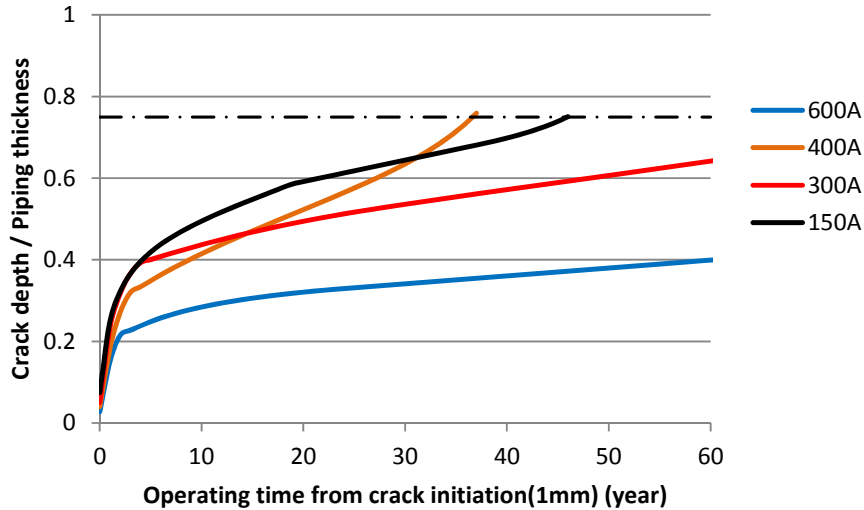


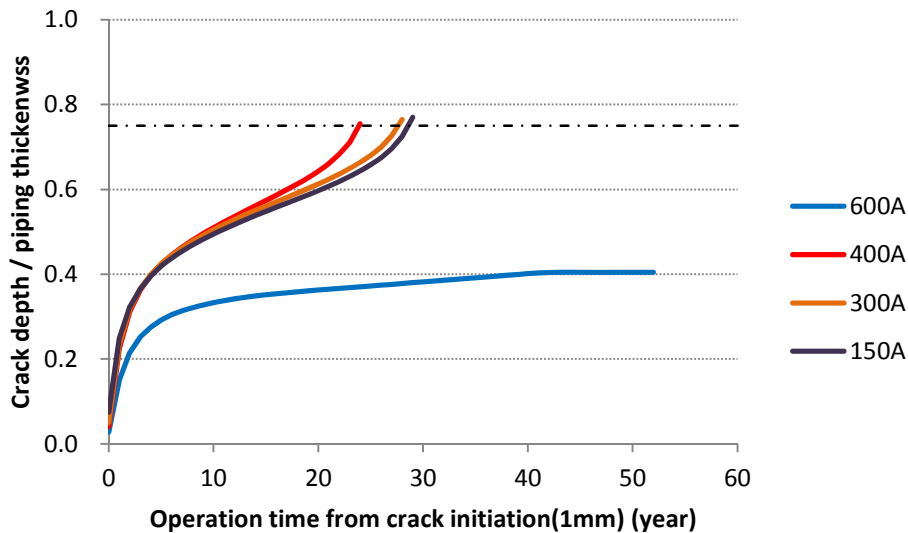
Figure 4.2-2 Weld residual stress.

応力拡大係数解は、Chapuliot らの解^(4-14,15)を用いて計算した。

この条件に従って、亀裂深さが 1.0mm の状態から進展していく経過を計算したものが図 4.2-3 である。SUS316 の 300A 配管と SUS304 および SUS316 の 600A の大口径配管は深さの進展が次第に遅くなり、運転期間として 60 年を想定しても貫通には至らない。一方で 150A のような小口径配管は、肉厚が薄いこともあり、比較的短時間で損傷に至ることがわかる。この結果は先行研究で得られた結果ともほぼ合致している。



(a) Low carbon stainless steel (SUS316)



(b) Sensitized stainless steel (SUS304)

Figure 4.2-3 Crack growth speed. There is no failure for 600A and 400A piping with low carbon stainless steel crack growth speed and 600A piping with sensitized stainless steel crack growth speed.

4. 2. 4 供用期間中検査の実施手順

ISI ではプラントの各クラスおよび系統ごとに偏りのないように点検対象箇所を選択することとしている。そこで、本検討では代表的な系統として、沸騰水型炉の再循環系配管を選択する。系統の概略図を図 4.2-4 に、ISI 対象となる継手数を表 4.2-2 に示す。この系統は、600A 程度の大口徑配管と、400A および 350A 程度の中口径管、部分的に 150A 程度の小口径管が組み合わされた系統である。原子炉圧力容器の再循環出口ノズルから炉水を取り出し、入口弁を経由して、再循環ポンプで加圧、出口弁を経て、リングヘッドで 5 系統に分岐し、ライザ管を経て、再循環入口ノズルから原子炉圧力容器に戻される。再循環出口ノズルからリングヘッドの手前までは 600A 程度の大口徑配管で構成され、リングヘッドは 400A や 350A の中口径管、ライザ管はそれよりも小さい 350A や 250A など構成される。また一部に配管内部を洗浄するときなどに使用するための除染座と呼ばれる枝管が設けられており、これは 150A 程度の口径である。なお、解析の対象とする配管のプラントに対する機能は、炉内の水を巻き込みながら、炉水を攪拌し、燃料集合体の熱を取り出す効率を向上させるものである。

なお、再循環系配管は、1つのプラントに 2 系統備えており、プラントによって配管の口径が多少異なる場合や、別の系統（残留熱除去系や浄化系）に分岐する部分の有無や構造が若干異なることがある。

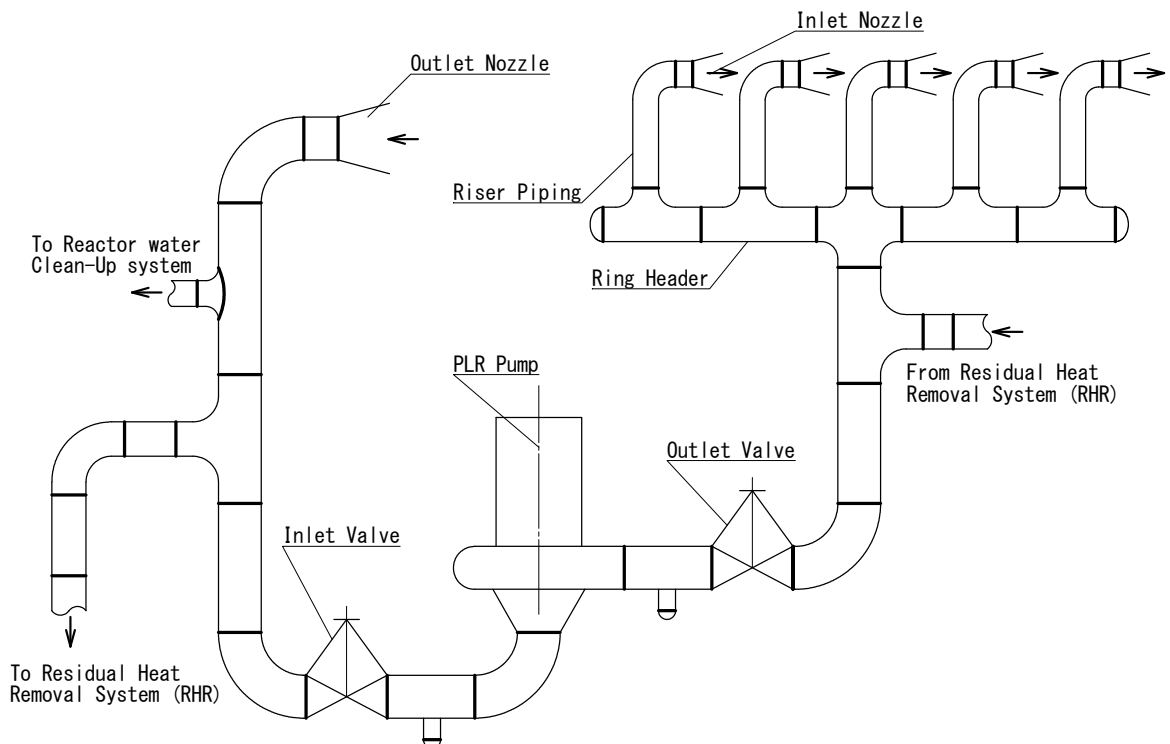


Figure 4.2-4 Model of piping loop system.

Table 4.2-2 Number of weld joint.

Nominal Diameter	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Number of Joint (1 plant)
600A(24B)	625	38	24
400A(16B)	416	26	12
300A(12B)	326	21	20
150A(6B)	165	14	6
Total			62

想定系統に対する ISI は、一般的に行われているように以下の条件に従って実施するものとした。

(ISI 実施スケジュール)

- ・ 供用開始から 40 年目までは、各 10 年（1 サイクル）で全体の継手数の 25%を検査する。
- ・ 41 年目から 60 年目までは、各 7 年を 1 サイクルとして、全体の継手数の 25%を検査する。
- ・ 対象とする 25%は、口径に偏りなく選択する。
- ・ 選択箇所は、各サイクルとも同じ継手を選択する（定点監視）。
- ・ 1 サイクル中に、定期検査は 8 回実施する（通常は 13 ヶ月運転し、定期検査期間となる。また、定期検査終了時には、総合負荷試験と呼ばれる実際の発電がおこなわれていることから、14 ヶ月の運転を想定する）
- ・ 各サイクルの期間中は、最終の定期検査では ISI を実施しない（検査不可等のトラブルがあった場合に定期検査が終了できなくなることを防止するため）。それ以外の定期検査では概ね均等に ISI を実施する。

(欠陥を検出した場合)

- ・ 当該定期検査で計画されていた箇所数と同じ箇所数を追加点検する。
- ・ 追加点検で欠陥が検出された場合には、全数点検を行う。
- ・ 追加点検及び全数点検を行っても、それ以降の定期検査は計画通り点検する。

(補修等の措置)

- ・ 欠陥が検出された継手は、検出された定期検査で取り替え補修を行う。
- ・ 補修は継手単位で行う。同一継手に欠陥が複数あった場合は、同時に全て補修される
- ・ 取替え補修によって、継手数が増えることなどは考慮しない。
- ・ 欠陥深さが、板厚の 75%に達した時点で、損傷（漏えい）として判断する。

4. 2. 5 損傷の可能性評価

損傷の可能性について、これまでの設定に従ってモンテカルロ計算でその可能性を検討した。計算フローを図 4.2-5 に示す。フローに従った計算を行うプログラムを作成し、POD が極端に悪い例、亀裂の進展が非常に速い例などの例で検証を行っている。

初期値を設定した後に、14 ヶ月間の運転期間中に存在している亀裂の進展、亀裂が無かった部位に発生する確率（発生させた乱数による）、発生した場合には経過時間に応じた進展を計算する。そこで亀裂深さが厚さの 75% に達していた場合には損傷（漏えい）と判断する。定期検査を実施し、対象箇所が存在している亀裂を POD に応じて検出可否を判断し（発生させた乱数による）、検出しなければ、定期検査は終了し、その定期検査が寿命期間である 60 年目であれば、プラントが健全に運転できたとする。定期検査で欠陥が検出されれば、その継手は補修し、同時に同数の箇所を追加検査する。同数箇所の追加検査でも POD に従った検出可否を判断し（発生させた乱数による）、検出されなければ次の運転に進み、追加検査で欠陥が検出されれば全継手の点検に入る。全継手の検査でも POD に従った検出可否を判断し（発生させた乱数による）、検出されれば補修し、次の運転期間に入る。このような計算を、POD 曲線を変化させながら、60 年分について実施する計算を 10^7 回の試行を行い、プラント運転期間中（60 年）に破損（漏えい）に至る確率を計算した。

4. 2. 6 検査能力に応じたプラントの損傷確率

図 4.2-6 に、低炭素ステンレス鋼（SUS316）の SCC 進展速度を想定した場合の計算結果を示す。

横軸に大きな欠陥の欠陥検出確率(m) (式(4.2-1))、奥行き軸に大きな欠陥とされる欠陥の深さ(a_1)とし、それぞれの場合の系統のプラントあたりの損傷確率を縦軸に示した。

ここで示すように、 a_1 が 10mm となると小口径管の板厚（14mm）に対する破損の判定値（75% t =10.5mm）に近づくことから破損確率が急に大きくなるが、8mm 程度までは破損確率は小さく、6mm 程度までは非常に小さく抑えられている。 m は、低下するにしたがって破損確率が大きく増加していく傾向がみられる。ここで示されるように、 m が 90% 程度に低下したとしても、 a_1 が 6mm 程度までであれば、損傷に至る可能性は非常に小さく、 10^{-7} 以下に抑えられている。1.3 項で示したように先行研究⁽⁴⁻¹²⁾の結果から、深さ 6mm より小さい、深さ 4mm 以上のきずでも全て検出可能であったことから、通常の検査で特に問題なく達成可能であろうと推定される、 m が 0.96 以上、 a_1 が 6mm 以下までの範囲であれば、破損確率は 10^{-7} 以下に抑えられている。つまり現状の検査技術が適切に適用されていれば、系統の破損確率は十分低く抑えられていると言える。このように、低炭素ステンレス鋼の SCC を想定した場合には、検査能力が現状よりもかなり低いことを想定しても、系統の破損につながる可能性は非常に小さいと言える。

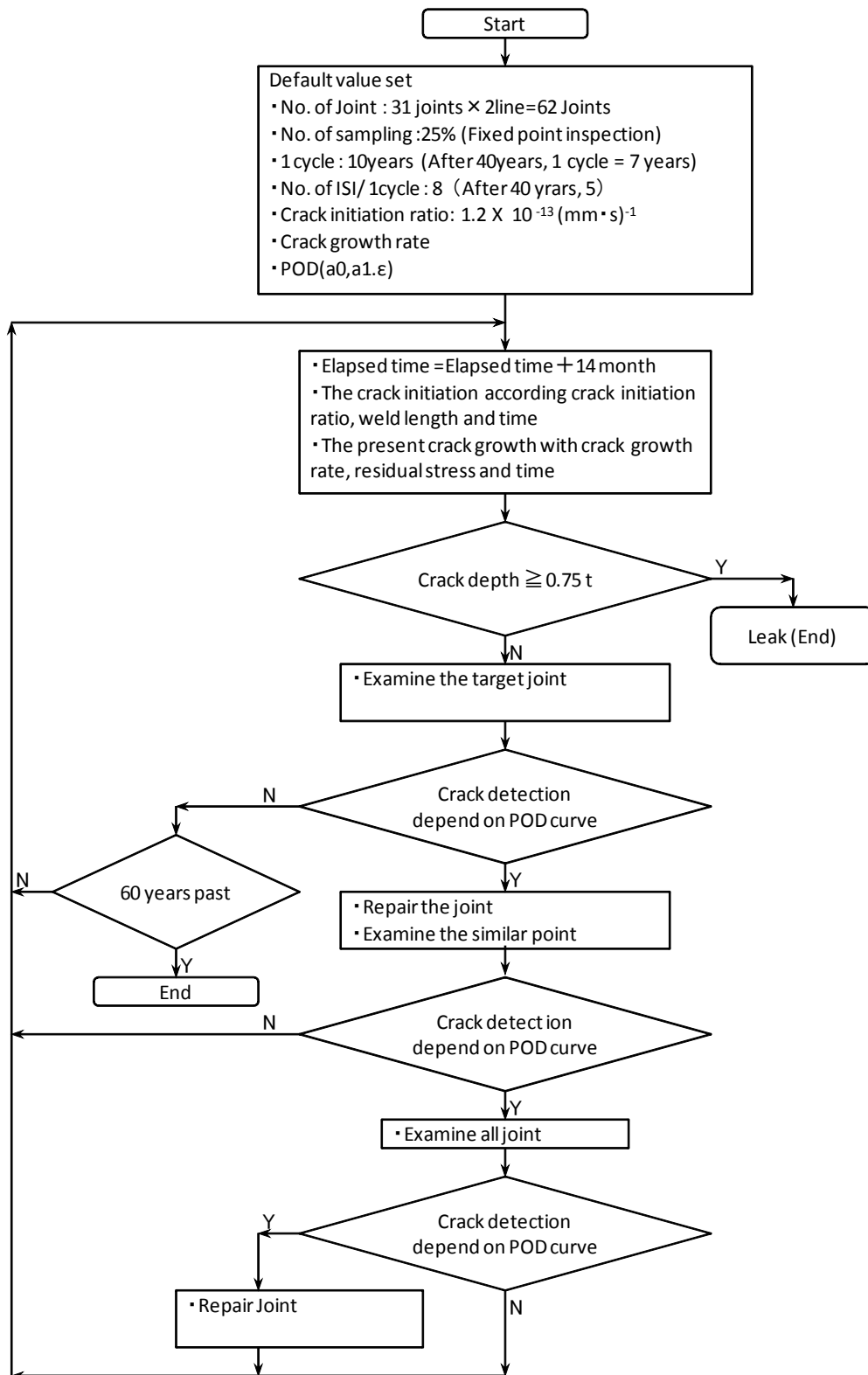


Figure 4.2-5 Calculation flow for failure.

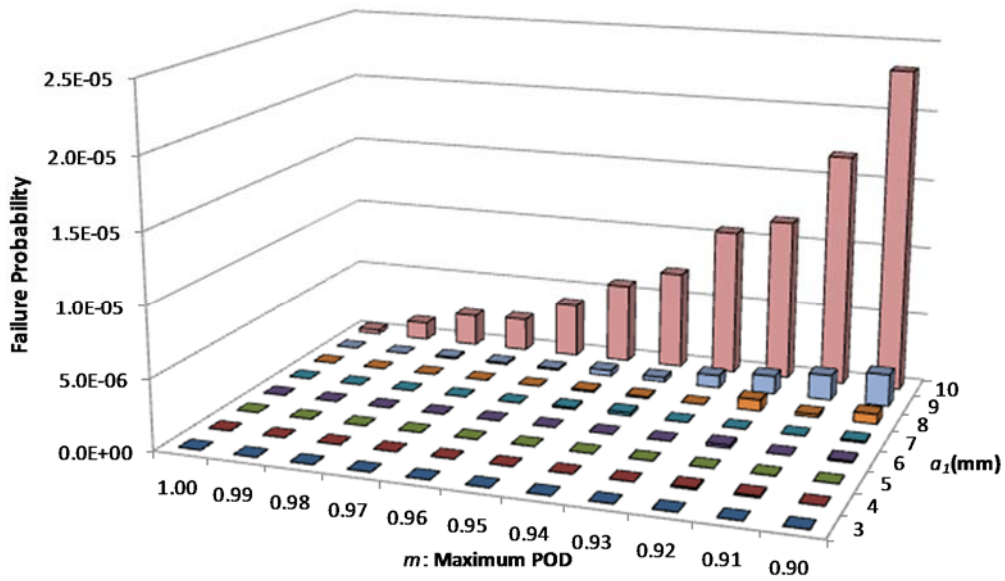


Figure. 4.2-6 Failure probability by low carbon stainless steel piping (SUS316) weld with IGSCC. The m and a_1 is not affected by damage probability even in pretty bad state. If m is 0.96 or less and a_1 is 6 or less, the damage probability is less than 1×10^{-7} .

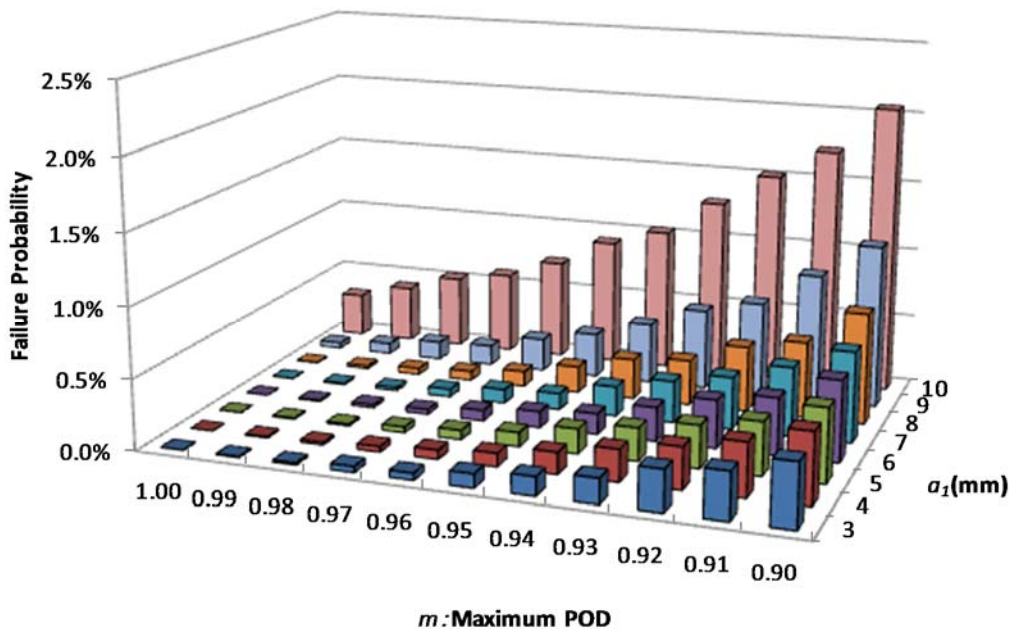


Figure 4.2-7 Failure probability by sensitized stainless steel piping (SUS304) weld with IGSCC. The m and a_1 is not affected by damage probability even in bad state. If m is 0.96 or less and a_1 is 6 or less, the damage probability is less than 1×10^{-3} .

図 4.2-7 に、鋭敏化ステンレス鋼（鋭敏化 SUS304）の進展速度を想定した場合の計算結果を示す。図 4.2-6 と同様に、横軸に大きな欠陥の欠陥検出確率(m)，奥行き軸に大きな欠陥とされる欠陥の深さ(a_1)とし，それぞれの場合の系統のプラントあたりの損傷確率を縦軸に示した。

鋭敏化ステンレス鋼の場合には，低炭素ステンレス鋼と比べて進展速度が速いことから，破損に至る確率が大きくなっている。傾向は低炭素ステンレス鋼と同様で， m が低下していくと破損確率が大きく増加し， a_1 が大きくなると同様に破損確率も大きくなる。しかし， m が 0.96 よりも大きく保たれている場合には，損傷確率の変化は小さい。 a_1 については低炭素ステンレス鋼の場合と同様に 6mm 近辺から増加傾向が強くなるが，6mm 以下で m が 0.96，あるいは a_1 を 3mm 程度で m を 0.95 程度であれば損傷確率への影響は小さい。この範囲内であれば計算上の損傷確率は 10^{-3} 以下に抑えられている。この損傷確率は，BS7910 で非冗長性の機器の中程度の破損確率である 10^{-3} と同程度となる⁽⁴⁻¹⁶⁾。すなわち鋭敏化ステンレス鋼の場合であっても， m が 0.96 以上， a_1 が 6mm 以下となるような検査能力があれば，系統の損傷確率に与える影響は小さく，検査能力としては十分であると言える。

4. 3 試験技術者の練度に応じたプラントの損傷確率

第 3 章の検討では，ISI 経験のある試験技術者であれば，概ね深さ 3.2mm 以上の欠陥について全て検出可能であるとの先行研究の結果を参考に検討を行った。また，信号強度(エコー高さ)についても，概ね深さ 3.2mm 以上で飽和することを示した。これらの情報から適切に検査を実施した場合には，深さ 3.2mm 以上の検出率は一定と考えることができる。そこで，4.2 項の検討と同様の手法を用いて，大きい欠陥とされる欠陥深さを 3.2mm に固定した計算を行った。その結果を図 4.3-1 に示す。

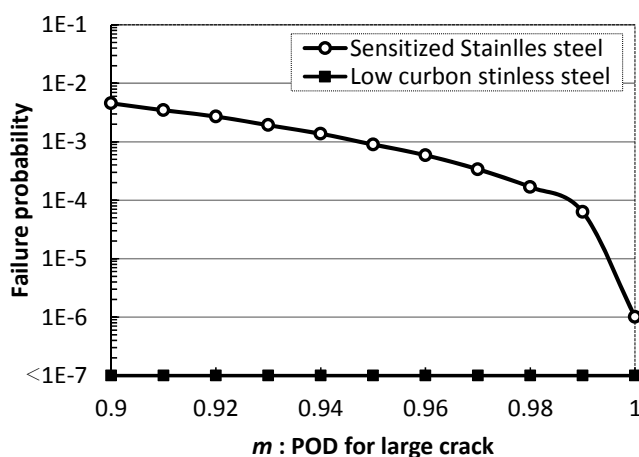


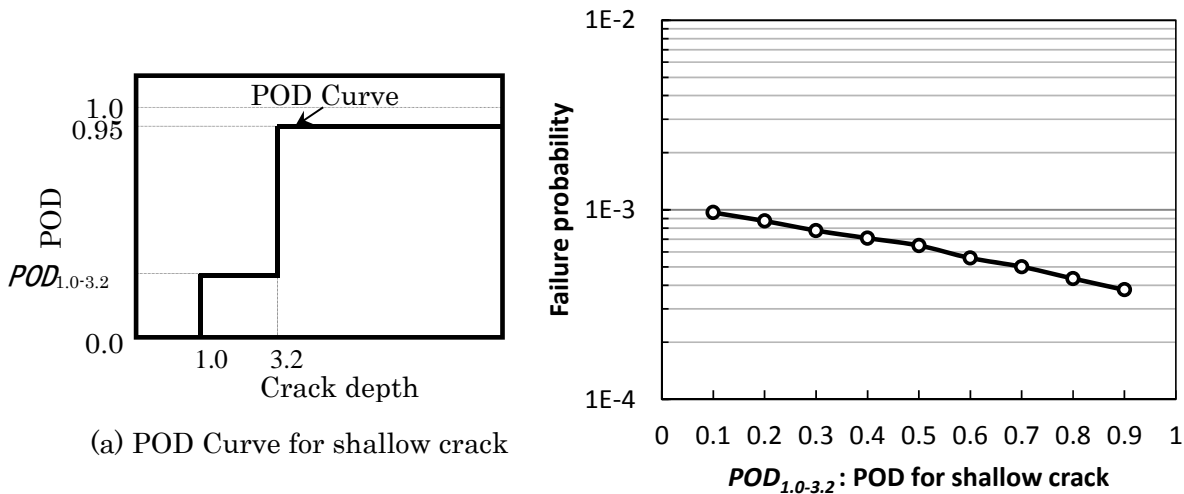
Figure 4.3-1 The evaluation of failure probability depend on POD of large crack. For low carbon stainless steel, the failure probability is lower than 10^{-7} even with low POD. For sensitized stainless steel 304, POD should be over 0.94 to keep failure probability over 10^{-3} .

この図で示す通りに、深さ 3.2mm 以上の検出率が一定だとした場合に、その検出率が 0.95 以上あれば、鋭敏化 SUS304 の進展速度を有する SCC を想定しても系統の破損確率は 10^{-3} 以下に抑えることが可能である。低炭素ステンレス鋼の SCC を想定した場合には、いずれの場合でも 10^{-7} 以下の破損確率に抑えることができる。このことは、POD が 0.98 程度である熟練者が実施している現状の ISI であれば、鋭敏化 SUS304 の SCC を想定しても系統の破損確率は 10^{-4} 程度が達成されており、熟練ではない有資格者が実施した場合でも適切に判断ができるような訓練や教育を適切に受講していれば（すなわち POD=0.95 程度が達成できていれば）、 10^{-3} 程度の破損確率が維持できることを示している。

大きい欠陥の POD をできる限り 1.00 に近づけることは、一般的には検査に対する要求としては当然であるが、3.3 節で議論したとおり POD と FCR は関連性があり、たとえ大きい欠陥であっても高い POD を要求した場合には FCR が増加することとなる。すなわち ISI においては 0.95 以上の POD で健全性を達成できるのであれば、それ以上を求めることは、FCR を不必要に増加させることとなる。POD=0.95 で、FCR=0.1 程度の検査能力は、信号を適切に判断することで達成できることが 3.3 節で示されていることから、配管系の健全性確認として求められる検査能力として、妥当な値であると考えられる。この場合の FCR=0.1 が許容されるかどうかは実際の ISI の運用にもよるが、他の試験技術者による確認探傷や、他の手法（例えば 2 次クリーピング波法を用いた探傷、端部エコー法などによる深さのある反射源か否かの確認）を行うことで大部分は欠陥ではないと判断できるものと考えられる。このような対応を行うことで、欠陥の誤検出による不要な補修工事や、対象を拡大する追加点検、全数点検などの多大なコスト負担はほぼ回避可能である。すなわちここでの通常の UT での誤検出に伴う損失は、確認のための探傷、ISI 工程の延長によるコストが考えられるが、それほど損失ではなく概ね許容範囲内であると考えられる。

試験技術者の練度が大きい欠陥の検出性ではなく、比較的小さい欠陥の検出性に影響を与えるとした場合を想定し、3.2mm 以下の欠陥の検出性について、変化させた例についても検討する。4.2 項の検討では、直線的に変化するものと仮定して検討を行ったが、これを図 4.3-2(a)に示すように深さ 1.0mm から 3.2mm の間は $POD_{1.0-3.2}$ であるとして、同様の計算を行った。大きい欠陥の検出率は 0.95 として計算した結果を図 4.3-2(b)に示す。横軸は比較的浅い欠陥の検出率($POD_{1.0-3.2}$)とし、系統の破損確率を縦軸に示した。

ここで示す通りに、比較的浅い欠陥の POD を変化させても系統の破損確率に与える影響は非常に小さい。これは図 4.2-3 に示すように、SCC は比較的小さい深さ 1.0mm から 3.2mm の範囲の進展速度が速く、この間に ISI の実施時期が重なることは稀であるためと考えられる。すなわち練度の低い試験技術者が ISI を実施した場合に問題となるのは、大きい欠陥を見逃す可能性がある場合であり、小さい欠陥を見逃す可能性が系統の破損確率に与える影響は小さいと言える。



(b) Failure probability by shallow crack POD
 Figure 4.3-2 The evaluation of failure probability depend on POD of "shallow" crack.

There is little effect on failure probability by "shallow" crack POD

4. 4 結 言

発電プラントの健全性を確認する ISI において、通常の点検方法および欠陥が検出された場合の追加点検を考慮すると共に、非常に大きな欠陥であっても POD が 100%にならないような人的要因を考慮したモデルを仮定し、検査能力が系統の損傷確率に与える影響について検討を行った。

低炭素ステンレス鋼の SCC については、全ての検査対象箇所が SCC 未対策とし、簡易 POD の m が 0.90 まで低下し、 a_1 が 8mm 程度という非常に悪い検査能力を仮定しても、破損確率は小さく抑えられていることが確認できた。通常の検査で特に問題なく達成可能と考えられる m が 0.96 以上、 a_1 が 6mm 以下であれば、 10^{-7} 以下の破損確率を達成することができる。

現在のプラントでは発生が考え難い、鋭敏化ステンレス鋼の SCC を想定した場合には、破損確率は大きくなるが、同様に m が 0.96 以上、 a_1 が 6mm 以下であれば、破損確率を著しく低下させることはない。また第 3 章の検討結果等によって、深さ 3.2mm 以上の欠陥の検出確率が一定であるとした場合では、 a_1 を 3.2mm として、 m が 0.95 以上であれば、系統の破損確率を充分低い値とすることができる。

一方で第 3 章の検討において、POD と誤検出率 (FCR) は互いに影響する関係であることが示されており、高い POD を要求した場合に FCR も大きくなることが明らかとなった。この、比較的大きな (深さ 3.2mm 以上) の欠陥の検出率 (POD) が 0.95 以上という値は、第 3 章の 3.2 節の検討で、熟練者であれば十分に達成可能であり、有資格者であっても概ね達成可能である。しかし有資格者の場合には誤検出率 (FCR) が大きく信頼性が低くなることが示されている。これに対して 3.3 節の検討で、適切に信号が検出され、その反射源位置

(Y位置)と信号強度(エコー高さ)が適切に記録され、適切に判断がなされれば、大きい欠陥のPODが0.98で、FCRを0.1程度に抑えることができることが示されている。

すなわち、システムの破損確率を十分低い値に抑えるために、ISIにおける試験技術者に期待される欠陥検出確率は、比較的大きい(深さ3.2mm以上の)場合で0.95以上である。そしてFCRを0.1程度まで許容できるのであれば、これを達成する試験技術者は必ずしも熟練者である必要はなく、有資格者であって、適切に信号を検出し、反射源位置と信号強度を記録、適切な判断ができるような者であればよいことになる。このことは有資格者を適切に訓練した上で、信号の検出や反射源位置、信号強度を適切に記録し、判断できることを確認できるような制度が必要である。

4章 参考文献

- (4-1) 一般社団法人 日本機械学会編「発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版)」, JSME S NA1-2012, 2012.
- (4-2) 一般社団法人 日本電気協会編, 「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」, JEAC4207-2016, 2016.
- (4-3) 日本工業規格, 「非破壊試験技術者の資格及び認証」, JIS Z2305:2013, 2013.
- (4-4) 町田秀夫, 「SCC き裂を有する配管の信頼性に対する非破壊検査性能の影響」, 日本機械学会論文集 (A編), 77巻 782号(2011-10), pp.1798-1813, 2011.
- (4-5) 永井政貴, 三浦直樹, 東海林一, 「確率論的破壊力学評価を活用した配管健全性評価ー破損確率に対する欠陥検出能力の影響評価ー」, 電力中央研究所 研究報告書, Q16007, 2017.
- (4-6) 一般社団法人 日本原子力産業協会編, 「世界の原子力発電開発の動向」, ISSN0915-0692, 2015.
- (4-7) 清水敬輔, 設楽親, 小林輝男, 山下理道, 岡田亮兵, 稲垣哲也, 中田親秀, 長松弘幸, 近畑英之, 山本幸司, 枡明彦, 牧原善次, 高津光志, 岩田潔, 東海林一, 「原子炉再循環系配管への超音波探傷試験実施・評価に関するノウハウ」, 保全学, Vol.8, No.4 pp31-36, 2009.
- (4-8) 日本原子力技術協会, 「予防保全工法ガイドライン[外面からの入熱による応力改善方法]」, JANTI-VIP-02-第1版, 2008.
- (4-9) 原子力規制委員会, 「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈」, 原規技発第1408063号, 2014.
- (4-10) 森田良, 内山雄太, 「フラッシングエロージョンの評価手法の構築」, 電力中央研究所 研究報告書, L11016, 2012.
- (4-11) 日本工業規格, 「超音波パルス反射法による厚さ測定方法」, JIS Z2355:2005, 2005.
- (4-12) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 「平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書(超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの[総括版]」, 05 基材報-0001(2/2), 2005.
- (4-13) Japan Electric Power Information Center, "The electric power industry in Japan", 2013.
- (4-14) 構造健全性評価ハンドブック編集委員会 編 代表 小林英男, 「構造健全性評価ハンドブック」, ISBN 4-320-08153-6, 2005.
- (4-15) Chapuliot, S., "Formulaire de KI Pour Les Tubes Component un Defaut de Surface Semi-elliptique Longitudinal ou Circonférentiel", interne ou extreme, Rapport CEA-R-5900, 2000.
- (4-16) British Standards Institution, "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures", BS7910:2005, 2005.

第5章 試験技術者の訓練方法と認定基準

5.1 緒言

軽水型原子力発電所の ISI (Inservice Inspection) に従事する超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing) 試験技術者は、基礎資格⁽⁵⁻¹⁾として日本非破壊検査協会による超音波探傷試験レベル1以上を有していることはもちろん、実際の ISI での経験があることも求められてきた⁽⁵⁻²⁾。これに対して近年のプラント稼働状況では経験する場が減少していることもあり、経験に代えて訓練を主体とした育成制度が提案されている^(5-3,4)。この制度は、現在は各検査会社が自主的に行っている訓練や探傷技術の指導、社内認定に対し、共通的な内容とすることで、試験技術者の技量を客観的に担保しようとするものである。

従来は熟練者が ISI に従事することで十分な検査能力があるものとしていた。その熟練者の能力とは、第3章の3.3節で示した通りに大きい欠陥の欠陥検出確率 (POD: Probability of Detection) で0.98程度、誤検出率 (FCR: False Call Rate) で0.1程度である。一方で、第3章の3.2節で検討したように、基礎資格を保持し、かつ通常の業務として ISI に限らず UT を実施している者であれば、欠陥の検出能力については熟練者と特に遜色がないとの結果が得られている⁽⁵⁻⁵⁾。しかし、ISI 経験のない者の場合は、欠陥ではない信号を欠陥として検出してしまう誤検出 (False Call) が多く、以降の確認のための追加探傷試験や、それに伴う工程延長、被ばく増加、不必要な補修工事などを招くこととなり、検査結果の信頼性としては不十分と考えられる。第3章の3.3節の検討において、信号強度 (エコー高さ) と反射源位置 (Y位置) の情報を基に適切に判断ができれば、熟練者の一つの目安である、深さ3.2mm以上の深さのある欠陥についての欠陥検出確率 (POD) で0.98、誤検出率 (FCR) で0.1を達成可能であることを示した。すなわち、目標とする FCR=0.1を維持した上で、熟練者と同レベルの POD=0.98は、適切な訓練を受講し、信号強度と反射源位置を適切に記録できることと、適切な判断ができることを確認することで達成できることを明らかにした。

さらに第4章の検討で、大きい欠陥の POD で0.95程度が達成できれば、プラントの健全性は充分確認できるとの結果も得られている。大きい欠陥の POD が0.98を達成できる熟練者が実施した場合の破損確率よりも、大きい欠陥の POD が0.95程度に低下した場合には破損確率は当然増加するが、その差は小さく、0.95程度であっても十分に低い値を維持できることを明らかにした。

すなわち ISI に従事する試験技術者は、熟練者である必要はなく、適切に信号を検出し記録可能で、適切な判断を行える能力があることが要件となる。これを達成することで、十分に低い破損確率を達成できる。

ISI を実施する検査会社が各々実施している試験技術者の訓練や教育の内容や期間については、これまでに十分な情報は得られてきていない。基礎資格の場合には、テキスト^(5-6,7)や講習会などが開催され、系統的な知識の習得および手順の確認などが行われている。ここで ISI に従事する試験技術者の場合には、系統的なテキストの整備は、各社のノウハウの観

点もあり整備が進んでいない。実習については、講師の指導方針および使用可能な試験体の数量などに大きく依存しており、各社で実施している訓練における指導のポイントなどについても整理されておらず、各社の熟練者の経験に基づいた内容である。

本章では、ここまでの検討結果および実機探傷事例と既往研究で得られたデータを信号検出理論に当てはめて評価した結果、熟練者が実施したとされる研究で得られているデータ(5-8,9)を基に、基礎資格を有した試験技術者で、通常業務として UT を実施している者を対象とした訓練の内容、および訓練を受講した試験技術者が、適切にその内容を習得したことを確認する達成度確認試験の内容について検討する。さらに訓練と達成度確認試験を実施した場合に、プラントの健全性に与える効果を検討する。

5. 2 試験技術者の訓練のあり方

第3章では、基礎資格を有した試験技術者は欠陥検出については、熟練者に近い能力を発揮するが、信号の判別能力が不十分であることを示した。熟練者の特徴と想定する訓練での指導内容について、以下にまとめる。

(1) 探傷作業

探傷作業において熟練者の特徴は以下の点があった。

- a. 探触子（センサ）を想定される欠陥に対して適切な方向に保持できている。
- b. 探傷範囲全体を、比較的速い速度で探傷し、疑義のある部分はじっくり確認している。
- c. 口径 350A 配管は約 20 分/半周（軸方向探傷のみ）の作業時間である。

この中で a.は想定欠陥からの信号（エコー）が最大になるように探触子を保持できていることにより、信号の見逃しなどを低減することにつながる。b.は全体を走査することで見逃しを低減し、周囲との違いのある、欠陥のある部分の特徴を検知することで、探傷時間を短縮し、かつ見逃しなどを低減することにつながる。c.は、欠陥検出性に直接影響を与えるものではないが、実際の探傷作業は放射線環境下での作業であり、時間制限のある中で焦らずに適切なパフォーマンスを発揮する観点で重要である。なお、ここで 20 分という時間は、バーチャル UT システムを使用した探傷結果であり、また欠陥信号以外は記録対象としていないこと、別に記録担当者がいる場合の値である。

これらのことから、探傷作業に関する、具体的な訓練内容は以下となる。これらの項目は、作業上のポイントであり、欠陥検出性には重大な影響を及ぼさないことから、訓練後の達成度確認は不要である。

- ① 探触子を想定される欠陥に対して適切に保持するように指導すると共に、その確認のために、バーチャル UT システムを使用して、そのずれ（正対する方向に対する標準偏差）が 2.0° 未満となるようにする。
- ② 探傷手順の指導として、最初に全体を見渡すような探傷を実施し、他の部位との違いのある部分を重点的に確認するようにする。またこの際にも、バーチャル UT システムを使用して、定められた走査範囲をカバーしていることを確認する。

③ 探傷訓練では、記録作成を含めて 350A 配管半周程度あたり 30 分以内で探傷可能であることを目標とする。

(2) データ採取要領および精度

データ採取要領については、ISI の通常の手順を習得することがポイントとなる。一般的には探傷手順書に従った探傷作業を行うが、ISI 実施現場で手順書を逐次確認しながら実施することは、被ばく等の観点からも実際的ではない。このため、詳細な部分を除いて探傷手順書を確認することなく作業を実施できるようにすることが一つの目標である。

データ採取精度については、熟練者を対象とした研究成果⁽⁵⁻⁸⁾の値が一つの目標となる。表 5.2-1 にその値を示す。ここで示す値は、付与欠陥別の計測精度（標準偏差）である。すなわち熟練者が、誤差の大きくなるような欠陥を探傷した場合でもこの程度の標準偏差に収まることを示している。すなわちこの程度の範囲で各データが計測できることが一つの目標である。また、探傷に先立って行う感度校正（キャリブレーション）においても、表 5.2-1 に示す感度範囲内で調整可能であることが目標となる。

Table 5.2-1 Measurement error range of high skilled UT engineer on UTS⁽⁵⁻⁸⁾ Project.

Item	Error range (Standard deviation)
Echo height	3.2 dB
X position (Circumferential position)	11.3mm
Y position (Axial position)	2.5mm

(3) 信号判別方法

信号の最終判定は、試験評価員と呼ばれる別の試験技術者が客観的に評価することになるが、試験技術者が一次判定を行うことから、この信号判定もある程度正確である必要がある。しかし、第 3 章の検討で、適切な信号強度（エコー高さ）と Y 位置を計測できれば、適切に判別できることが示された。このことから、信号の判別については、適切な判別方法を学習すると共に、実際の欠陥信号を検出し、判別する手法を習得することが、訓練のポイントとなる。

これら(1)~(3)の指導のポイントは、得られた欠陥信号を適切に判定するために必要な要件である。この 3 点を達成するためには探傷作業に習熟することが必要である。既述の通り、探傷手順書に従って作業を進めるが、手順を習熟することで、安定した探傷および各計測が行えることとなる。過去に行われた、試験技術者の訓練の内容を検討した研究において、試験を含めて 5 日間程度の実習を行うことが提案されている⁽⁶⁻⁴⁾。なお、この検討では、UT 資格を有しているが、探傷作業を通常業務としていない試験技術者も含まれている。このため、感度校正や探触子の走査など基本的な訓練等にも時間が割かれたものと思われ、実習後で

も十分な検査能力は発揮されていない。

ここまでの検討で、推奨される訓練内容を以下のように提案する。通常の業務で ISI 以外の UT を実施している者であれば、より短期間の訓練でも十分な成果が得られるものと考えられる。

(a) 講習・学習

- ・対象となる手順書内容の理解
- ・欠陥信号の判別方法
- ・その他 ISI に特有な探傷技術や記録方法など

(b) 実習

- ・感度校正
- ・探触子の保持（角度）
- ・全体を見渡す探傷と詳細な確認の組み合わせ
- ・30分/半周程度で探傷を行う手順の習得
- ・データ採取精度（エコー高さ，X位置，Y位置）
- ・実際の信号判別訓練

5. 3 試験技術者の訓練成果確認基準

5. 3. 1 確認基準の考え方

これまでの議論で、ISI に従事する試験技術者は、基礎的な資格を有し、かつ適切な訓練を受講することで、クラス 1 配管の健全性を担保するのに十分な検査能力に達することができることが判った。訓練を実施した後は、実際にその検査能力に達していることを、達成度確認試験などで確認した上で実機探傷を実施する必要がある。

訓練成果の確認を行う場合に、できるだけ多くの試験体を探傷し、その技量を直接評価することが理論的には適切である。しかし、実際に訓練のカリキュラムを考えた場合に、達成度確認試験に多くの時間を割くよりも、実際の訓練に費やす時間を多くする方が技量の向上の観点としては望ましい。このため、達成度確認試験はできるだけ簡略化し、短時間で実施できることが望ましい。これについて、検討を行う。

(1) 検出精度に関する評価

第4章での検討が示す通り、比較的大きい深さ 3.2mm を超える欠陥についての検出性が配管の健全性を担保する上で問題となることを念頭に、第3章で検討した 2 要素の判別グラフ（図 3.3-10(a)）上で評価する。図の検出信号（Crack echo）と疑似信号である溶接裏波エコー（Weld root echo）の各々の確率密度分布曲線の頂点を結ぶ線上に探傷結果を投影して判定を行うことで精度よく判定可能⁽⁵⁻¹⁰⁾で、熟練者と同程度の判断が可能である。判別にあたっては検出された信号をこの線上に投影した位置で識別を行うことで最も適切な判別になる。この線上の位置を X_1 で示すが、 X_1 は以下の式で示される。

$$X_1 = \left(\frac{((Y_{n\mu} - Y_{s\mu})^2 + (X_{s\mu} - X_{n\mu})^2)^{1/2}}{X_{s\mu} - X_{n\mu}} \right) (X - X_{n\mu}) \quad \dots \dots \dots (5.3-1)$$

または

$$X_1 = \left(\frac{((X_{s\mu} - X_{n\mu})^2 + (Y_{n\mu} - Y_{s\mu})^2)^{1/2}}{Y_{n\mu} - Y_{s\mu}} \right) (Y - Y_{n\mu}) \quad \dots \dots \dots (5.3-2)$$

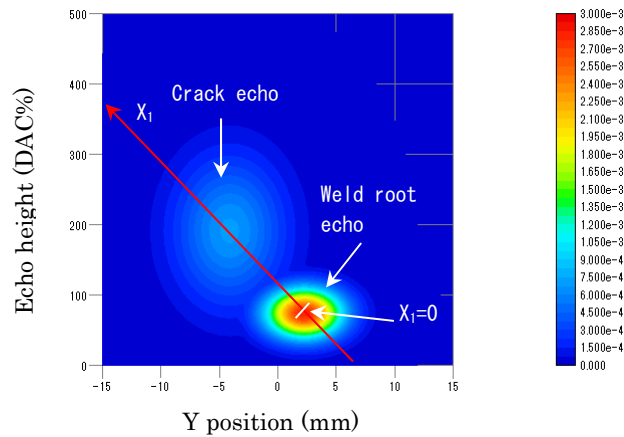
ここで、

- $X_{s\mu}$: 欠陥信号強度の平均値
- $X_{n\mu}$: 裏波形状信号強度の平均値
- $Y_{s\mu}$: 欠陥信号の Y 位置の平均値
- $Y_{n\mu}$: 裏波形状信号の Y 位置の平均値
- X : 検出された信号強度(DAC%)
- Y : 検出された Y 位置(mm)
- X_1 : 識別線上の位置

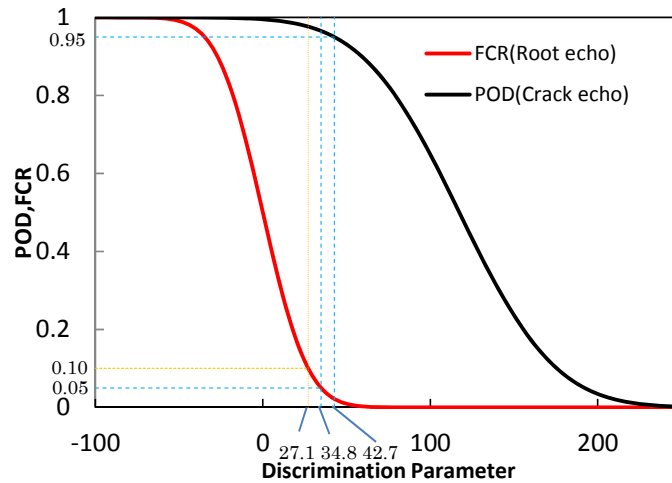
これを示したものが図 5.3-1 である。図 5.3-1(a)は図 3.3-10(a)と同図に、 X_1 軸を示したものである。図 5.3-1(b)はこの X_1 の線上の、欠陥信号 (POD) と裏波形状信号 (FCR) の累積密度分布を示したものである。

ここで、観測された信号強度 (エコー高さ) X または観測された反射源位置 (Y 位置) Y の値に誤差があった場合には、この図の X_1 が影響を受け、POD または FCR も影響を受けることになる。深さ 3.2mm を超える欠陥についての計算で、POD を 0.95 以上に保つためには $X_1 \leq 42.7$ 、FCR を 0.1 以下に抑えるためには $X_1 \geq 27.1$ となるが、FCR についてはプラント健全性との関連が厳密には計算されていないことから 0.05 以下を目安とし、 $X_1 \geq 34.8$ とする。この範囲に相当するエコー高さおよび Y 位置の範囲を表 5.3-1 に示す。ここでこの POD と FCR を示す曲線はすでに熟練者に相当する計測誤差が含まれている。すなわち、熟練者の標準的な計測精度よりも低い計測精度で、求められる判定精度である POD=0.95、FCR=0.1 程度が達成可能であり、熟練者の計測精度と比べて、表 5.3-1 に示す範囲誤差を加えた誤差までは許容されることとなる。表 5.3-1 の許容誤差の範囲に、熟練者が実施した場合の計測誤差 (表 5.2-1) の値を加算したものが、表 5.3-2 である。この範囲内で各データが計測可能であれば、大きい欠陥で欠陥検出確率 (POD) 0.95 以上、誤検出率 (FCR) 0.1 以下の検出性能が期待できる。このときにエコー高さの計測誤差が重要になる範囲は DAC100~120%程度の範囲、Y 位置については Y=0 近辺であることがわかる。計測誤差を評価する場合には、主にこの範囲にあるような信号を対象とすることが望ましい。

ここで周方向位置 (X 位置) については、検出性との関連はないが、検出された欠陥信号の位置、すなわちどの欠陥を検出したのかを明確にする点で、許容基準に取り込んだ。なお X 位置については、周方向に短い (使用している探触子の幅程度) のものであれば、欠陥信



(a) Probability density distribution for echo height and Y position for crack depth $\geq 3.2\text{mm}$ (Same figure as figure 3.3-10(a))



(b) Cumulative density distribution of POD and FCR with X_1 parameters

Figure 5.3-1 Cumulative Frequency for echo height echo height depends on crack depth. The high accuracy discrimination can be achieved (a) for deep crack, but difficult discriminate for shallow crack(c) by using 2D discrimination combining echo height and Y position.

Table 5.3-1 Acceptable error for echo height and Y position for low.

	X_1	Echo Height (X: DAC%)	Y Position (Y: mm)
FCR ≤ 0.1 (FCR ≤ 0.05)	≥ 34.8	≥ 108.8	≤ 0.4
POD ≥ 0.95	≤ 42.7	≤ 116.7	≥ -0.1
Range	—	7.9 (0.6dB)	0.5

Table 5.3-2 Proposed acceptance criteria for measurement error.

Item	Acceptable error range
Echo height	3.8 dB
X position (Circumferential position)	12.6 mm or crack length
Y position (Axial position)	3.0 mm

号が最大になる位置は一定となるが、長い欠陥の場合には欠陥信号が長い範囲で観測されることになる。このため判定としては、短い欠陥については標準偏差（ σ ）の範囲、長い欠陥については、付与欠陥の長さの範囲内とすることが妥当と考えられる。

ここで着目すべき点は、これらのエコー高さや Y 方向位置の計測精度は、欠陥の信号である必要がないことである。すなわち、検出性確認試験において、欠陥以外の信号の計測精度を基に検出性の確認をすることもできる。

(2) 判定に関する妥当性評価

上記(1)の判定は、"正しく計測可能であること"を確認する判定基準である。これに対して、"適切に判断の方法を理解しているか"という観点での評価が必要である。これを欠陥検出に重点をおいて判定を行った場合には、多数の試験体を実際に探傷し、欠陥を検出する必要がある。式 5.3-3 および式 5.3-4 は、ある POD および FCR を有した受験者が、各々の判定基準に対して合格する確率を示したものである⁽⁵⁻¹⁰⁾。

$$Pass(FCR) = \sum_{k=0}^{C_0} \binom{N}{K} FCR^k (1-FCR)^{N-k} \dots \dots \dots (5.3-3)$$

$$Pass(POD) = \sum_{k=C_1}^M \binom{M}{K} POD^k (1-POD)^{M-k} \dots \dots \dots (5.3-4)$$

- ここで、
- $Pass(FCR)$: 誤検出判定基準に合致する確率
 - $Pass(POD)$: 検出率判定基準に合致する確率
 - POD, FCR : 受験者の欠陥検出確率(POD)および誤検出率(FCR)
 - N : 無欠陥領域数
 - M : 欠陥あり領域数
 - C_0 : 許容誤検出数
 - C_1 : 許容見逃し数

目標とする、POD=0.95 以上、FCR=0.1 以下を確認するためには多数の試験体(欠陥数および無欠陥数)によるデータが必要である。統計で一般的に用いられる 95%信頼度(棄却 5%)で、POD=0.95、FCR=0.1 を確認するためには図 5.3-2 に示す通りに、POD については 59 個の欠陥を全て検出すること、FCR については 29 個の無欠陥領域を全て正しく判定する

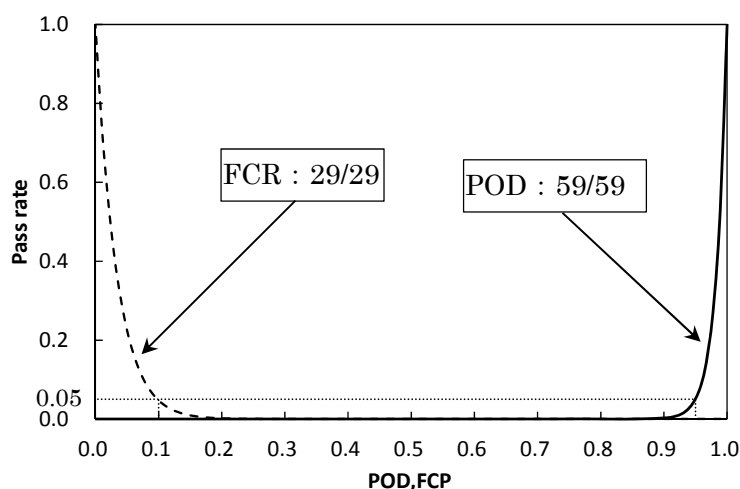


Figure 5.3-2 Pass rate for each POD, FCR candidate with 95% confidential level. 29 unflawed area with no false call and 59 flawed area with no miss call is required to confirm $POD=0.95$ and $FCR=0.1$.

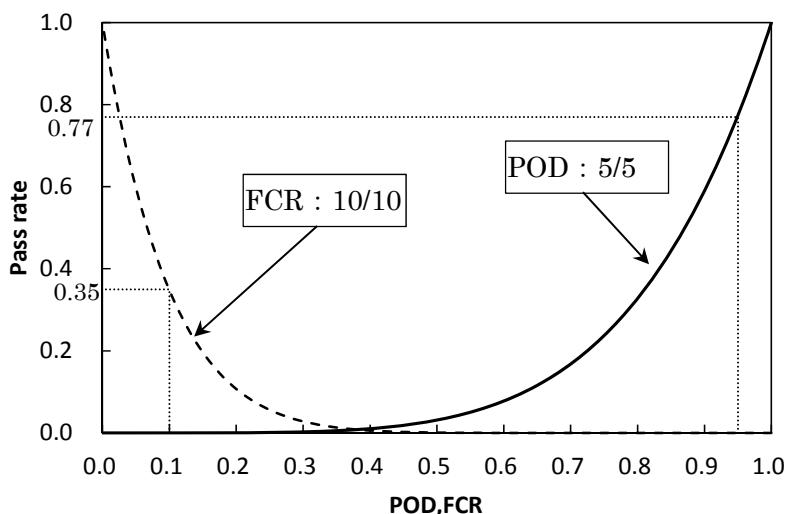


Figure 5.3-3 Pass rate for each POD, FCR candidate based on minimum ASME acceptance criteria. A candidate with $POD=0.95$, $FCR=0.1$ pass rate is 0.77 and 0.35. It means confidential level is 0.22 and 0.65.

ことが求められる。実際にこの試験を行おうとした場合には、欠陥を付与した試験体を多数準備する必要があるが、実機を模擬した人工欠陥を付与した試験体は、仕様にもよるが、1体で数百万円から数千万円数にもなる場合もあり、多数の試験体を用意することは現実的ではない。また 59 個の欠陥と 29 個の無欠陥部位とすると、多くの部分に欠陥があることとなり、実際の実機プラントのようにごく稀に欠陥が検出される例からかけ離れたものとなる。

参考として米国 ASME⁽⁶⁻¹¹⁾の判定基準を参照すると、最も少ないサンプル数は、付与欠陥 5、無欠陥領域 10 である。この場合の合格率を示したものが図 5.3-3 である。ここで示されるように統計的な考えでは、POD=0.95 である受験者が 5 個の欠陥を 5 個検出する試験に合格する確率は 0.77 であるが、5 個の欠陥を 5 個検出した受験者が POD=0.95 以上である信頼度は 0.23 となる。同様に FCR=0.1 の受験者が 10 個の無欠陥領域を正しく無欠陥と判断できる確率は 0.35 であるが、10 個の欠陥を正しく無欠陥と判断した受験者が FCR=0.1 以下である信頼度は 0.65 となる。このことは、米国 ASME の基準をもって統計的に POD や FCR を保障することは難しく、ASME の基準もある程度の能力があるとの前提での試験であるといえる。

統計的に適切な POD や FCR を実際に確認することは、訓練実施後の達成度確認試験としては、試験時間、対象者が訓練である程度のレベルにあると考えられること、試験体などの整備の観点で適切とは考え難い。そこで、これまでの検討で FCR と POD の関係を明らかにしてきたことから、FCR のみを判定基準に反映する。すなわち、FCR と POD の関係は、本項(1)の確認によって、第 3 章で得られた ROC 曲線上にほぼあると考えられることから、FCR を確認することで POD を確認していることとなる。第 1 章で述べた信号検出理論 (表 5.3-3) であれば、信号 (Signal) に対して適切に検出 (Hit)する確率を確認することが目的であるが、特に 0.95 程度という比較的高い POD を確認するためには多数の試験が必要となる。そこで、表 5.3-3 に示す反応が成立しているとすれば、ノイズ (Noise) に対して適切に除外 (Correct Rejection) できること、すなわちノイズに対する誤検出 (False Call) の値を計測することで POD を確認することができる。すなわち 29 個の無欠陥領域を含む試験体について探傷試験を行い、無欠陥であると判断できれば、POD が 0.95 以上あることが確認できる。

なお、実際の試験を実施することを想定すると、FCR のみに着目した場合に、全てで欠陥ではないと判断すれば合格となってしまふことから、少数の欠陥は含んだ試験体とし、POD=0.95 を求める深さ 3.2mm 以上の付与欠陥については全て検出していることが前提となる。

Table 5.3-3 Basics of signal detection theory (same as Table 1.2-1)

		Judge (Respond)	
		Call (Yes)	No
Reflector (Input)	Crack (Signal)	POD (Hit)	Miss
	Weld root (Noise)	False Call, FCR (False alarm)	Correct Rejection

(3) まとめ

ここまでの検討で、訓練を実施した後の達成度確認試験で注目するポイントは、採取されたデータのエコー高さの計測精度、Y位置の計測精度、FCR（欠陥誤検出率）の3つが挙げられた。エコー高さの計測精度については、熟練者であっても3.2dB程度の標準偏差での計測精度であるが、適切な判定のためには3.8dB程度の標準偏差まで許容可能である。Y位置についても熟練者でも2.5mm程度の標準偏差をもった計測精度であり、許容基準は3.0mmである。この精度で計測可能であれば、適切な判断が可能となる。その上で適切な判断を行う能力があることをFCR（欠陥誤検出率）で確認することで、大きい欠陥のPODを確認することができる。

実際に訓練を実施した後の達成度確認試験では、受験者がFCRだけに注意して、欠陥ではないと否定する方向に判断することを避けるために、少数の付与された大きい欠陥は全て検出することが判定としては必要である。この際に検出した欠陥が、実際に付与されたどの欠陥を検出したのかを確認することが必要であり、どの欠陥を検出しているかを特定するためのX位置(周方向位置)も記録させる必要がある。

5. 3. 2 成果確認に必要な検証データ数

ここまでの検討で、訓練を実施した後の達成度確認試験で注目するポイントは、採取されたデータのエコー高さの計測精度、Y位置の計測精度、欠陥誤検出率（FCR）の3つが挙げられた。他にX位置（周方向位置）の計測精度と、付与された大きな欠陥を適切に検出することも対象となる。前項の検討で、目安となる判定基準を特定した。ここでは試験を行う上で、必要なサンプル数について検討する。ここでの前提条件として、受験対象者は訓練を経た者であって、基本的な能力は熟練者と同程度のレベルに達していることとする。

(1) 信号強度（エコー高さ）

熟練者の計測事例では、信号強度（エコー高さ）の標準偏差は3.2dBである（表5.2-1）。また、健全性を確認できるレベルとして、標準偏差で3.8dBであることを5.3節（表5.3-2）で明らかにしている。そこで、訓練を受講した者は、熟練者と同レベルである3.2dBであるとして、達成度確認試験の受験者が3.8dBの判定基準に合格する確率を、サンプル数と共に計算したものが図5.3-4である。また合わせて、訓練の成果が十分に得られていない、標準偏差が3.9dBの受験者が合格する確率も示す。横軸に採点対象とするサンプル数、縦軸に3.2dBの標準偏差で計測可能な者、および3.9dBの標準偏差で計測可能な者が、3.8dBの標準偏差以内という判定基準を適用された場合の合格率を示している。計算は予測される測定結果を3.2dBの標準偏差を持つ疑似乱数をサンプル数回発生させ、合格するか否かを計算する計算を、 10^5 回繰り返したものである。この図からは、5データ以上で判定を行えば、3.2dBの標準偏差で計測可能な者は、95%以上の確率で3.8dBの判定基準に合格できる。一方で3.9dBの者は5データ程度で評価することで、80%程度の合格率に抑えることができる。しかし、この方法はサンプル数を増やすほど合格率が上がっていく問題があ

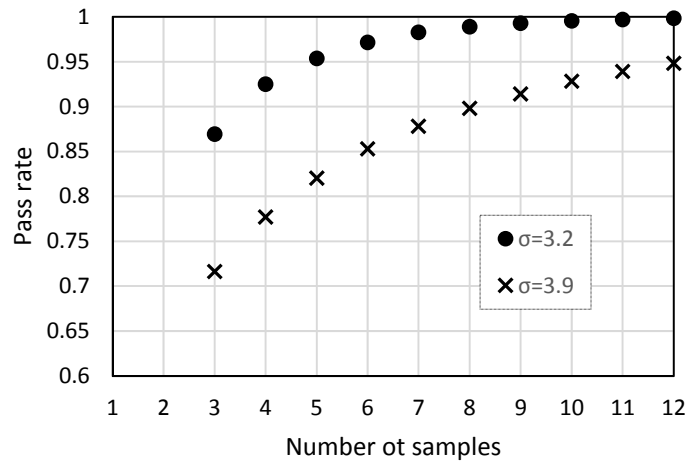


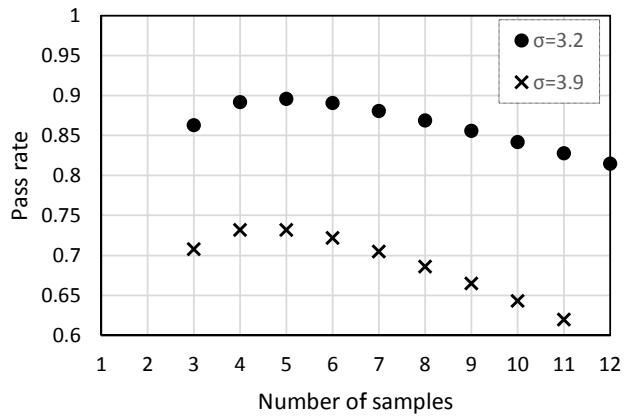
Figure 5.3-4 Pass rate for candidate with standard deviation =1.6 on acceptance standard =1.90 as echo height for each sample number. For keep pass rate over than 0.95, number of samples should be 5 or greater.

る。なお、データ数を5個などと限定した場合に、受験者が付与欠陥の数に対する先入観を持つことになり、欠陥検出（無欠陥部判定）の試験としては適切ではない。

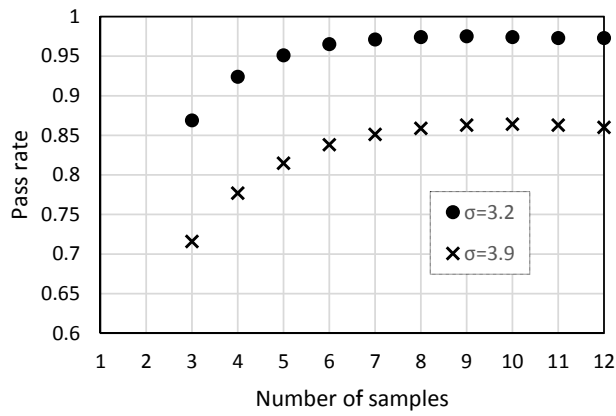
判定方法として、上限値を設定し、これを1つでも超えた場合に不合格とする案もある。この判定方法は、計測値が正規分布に従うとした場合に、この判定基準を用いるとデータ数が多くなるほど合格率が低下するという問題はある。この特性を、標準偏差による判定に加えて行うことで、より高い精度での判定を目指す。最大許容誤差を、熟練者の 1.5σ (4.8mm)とした場合、熟練者の 2σ (6.4mm)とした場合、許容範囲の 2σ (7.6mm)とした場合3ケースについて計算した結果を図5.3-5に示す。

図5.3-5の図はいずれも横軸に評価対象のサンプル数、縦軸に合格率を示し、各々標準偏差3.2mmで計測可能な熟練者と考えられる受験者と、訓練が不十分であったと考えられる標準偏差3.9mmの受験者の場合を示した。ここで示されるように、標準偏差の判定に加えて、最大誤差による判定を加えることでデータ数が増やせば、合格率が向上する傾向を抑えることができる。この中でも熟練者の標準偏差の2倍 (2σ) を基準とした場合に、データ数による合格率の増加は概ね抑えられている。データ数を概ね6以上とすることで、熟練者の合格率は95%以上にすることが可能で、訓練が不十分な者は85%程度に抑えることができる。

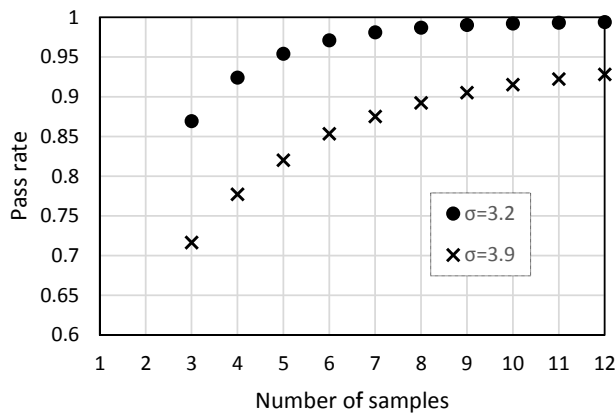
ここで、合格率の妥当性について検討する。熟練者と同等の技量を習得した者が95%以上で合格することは、信頼度の指標としては統計的にも概ね妥当と考えられる。一方で訓練が不十分な者の合格率については、本案では信号強度（エコー高さ）の計測精度、反射源位置（Y位置）の計測精度、誤検出率の主に3つの判定基準を選択している。この場合に訓練



(a) Critical miss threshold 4.8dB



(b) Critical miss threshold 6.4dB



(c) Critical miss threshold 7.6dB

Figure 5.3-5 Pass rate for candidate with standard deviation =3.2 and 3.9 on acceptance standard =3.8 and critical miss call. The critical miss call 6.4 is good for reduce pass rate for untrained personnel.

が不十分な者は、そのいずれかの判定基準に抵触するものと考えられ、 $0.85^3=0.6$ 程度の合格率となる。ちょうど判定基準程度の技量の者が 60%の合格率であることの適切性についての理論的な説明は難しいが、訓練を受講した後の達成度確認であること、効率的に明らかに訓練が不十分な者は不合格にできると考えられること、本来必要な訓練時間や実機の探傷作業コストの観点で短時間での試験が望まれることから、概ね妥当と考えられる。

なお、5.3.1(1)で論じたとおり、エコー高さの計測精度を評価するための反射源は、欠陥である必要はなく、そのエコー高さは DAC100~120%程度を中心に確認することが望ましい。

(2) Y 位置

同様に Y 位置の計測精度についても検討する。熟練者の実際の測定事例では、標準偏差 2.5mm 程度とされており(表 5.2-1)、提案の判定基準は 3.0mm としている。同様の計算を行った結果を図 5.3-6 に示す。エコー高さの検討と同様に、5 データ以上で判定を行えば、95%以上の確率で合格となり、訓練が不十分と思われる者については、5 データ以下での判定をすることで 0.85 程度の合格基準となる。ここでも同様にデータ数が増えるほど合格率が向上する。

このため同様に、誤差の上限値を設定し、判定する方法を組み合わせた例を図 5.3-7 に示す。熟練者と同レベルの標準偏差の 2σ (5.0mm) を誤差の上限値として設定した場合において、概ね 6 データ以上のデータで評価することで、一定の合格率になる。また熟練者と同レベルの標準偏差で計測可能な場合には合格率で 95%以上を維持し、訓練が不十分とされる標準偏差で 3.0mm 以上の計測精度を持つ者は、85%程度の合格率となる。

前述の(1)で示した通りに、熟練者と同レベルの技量を有する者の合格率が 0.95 で、訓練が不十分な者の合格率が 0.85 程度となり、概ね妥当と考えられる。

同様に 5.3.1(1)で論じたとおり、反射源位置の計測精度を評価するための反射源は、欠陥である必要はなく、その反射源位置は $Y=0$ 、すなわち溶接中心近傍にある反射源を用いて確認することが望ましい。

(3) 無欠陥部位の判定

無欠陥部位の判定については、図 5.3-3 に示した通りに、29 個の無欠陥領域に対して、29 個を無欠陥であると判定することで、誤検出(無欠陥部を欠陥と誤認識する比率)を 0.1 以下であると、信頼度 0.95 で確認することができる。すなわち合格率は 0.95 となる。

(4) X 方向位置

X 方向位置は、欠陥の識別性に影響を与えるものではないので、検出性の観点での裏付けは困難である。このためエコー高さおよび Y 位置と同様に 6 データ以上について、判定基準内であることを確認するものとする。

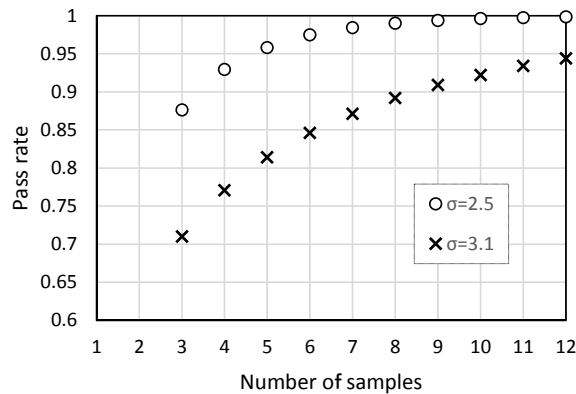


Figure 5.3-6 Pass rate for candidate with standard deviation =2.5 on acceptance standard =3.0 as Y position for each sample number. For keep pass rate over than 0.95, number of samples should be 5 or greater.

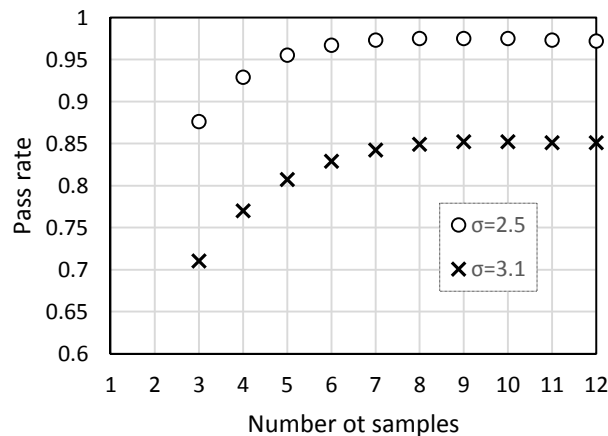


Figure 5.3-7 Pass rate for candidate with standard deviation =2.5 and 3.1 on acceptance standard =3.0 and critical miss call = 5.0. The critical miss call 5.0 is good for reduce pass rate for untrained personnel.

(5) 欠陥検出性の判定

欠陥の検出性については、既述の通り技術的に証明するためには、多数の欠陥に対して検出性試験を行う必要がある。これを FCR で確認していることから、検出対象としては上記(1)および(2)の評価に必要な数である 6 個以上とする。深さ 3.2mm を超える欠陥については、全て検出できることを要求し、深さ 1.0mm~3.2mm までの欠陥については、試験対象として含めるが、誤検出の判定で評価する。

5. 3. 3 試験技術者の訓練成果確認基準案

ここまでの検討結果から，試験技術者が訓練を受講した後の達成度確認として行う，訓練成果確認基準を検討する．

- (a) 採点単位 (Grading Unit) : 欠陥の有無，あるいは無欠陥領域をどの範囲で区切るかについて検討する．実機で発生した SCC の長さに関する統計評価は行われていないが，検出された最大深さの SCC は 15mm 程度であり，アスペクト比 3 を設定しても 45mm 程度の長さとなる．また ASME⁽⁵⁻¹¹⁾ の場合には 3 インチ(75mm)とされている．これらのことから，75mm を採点単位とすることが適切と考えられる．(図 5.3-8)

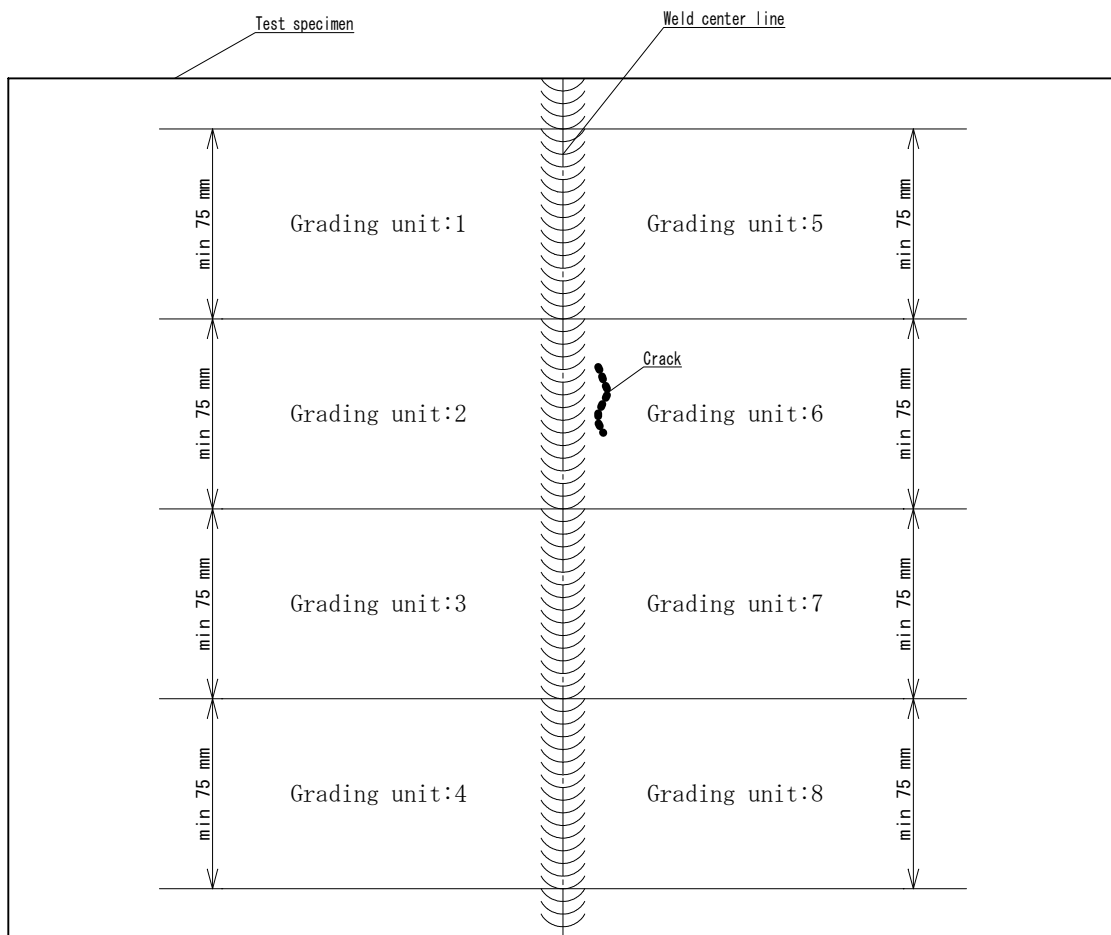


Figure 5.3-8 Conceptual drawing of grading unit.

- (b) 試験体の寸法 (口径) : 現状で検討されている訓練指針案は，その探傷性を考慮して，対象とする配管口径に応じて，大口径，小口径とその中間としている．このため達成度確認試験についても，3種類の口径で実施することが妥当と考えられる．なお，現状の国内で実施している亀裂深さ測定の技量実証試験(PD)試験⁽⁵⁻¹²⁾でも対象とする口径の大口径 (600A)，中口径 (350A)，小口径 (150A) としている．

- (c) 欠陥付与数 : これまでの検討で、欠陥検出性は無欠陥領域を適切に判定できることで確認できるとした。信号強度や Y 位置の計測精度を確認するために深さ 3.2mm 以上に相当する欠陥を 6 個以上の欠陥を付与するものとし、深さ 1.0mm~3.2mm までの欠陥も数個使用することで、FCR が適切に判断できているかを確認する。信号強度（エコー高さ）および反射源位置（Y 位置）の評価に用いる欠陥信号については、エコー高さが概ね DAC100~120%程度を中心にばらつくこと、反射源位置は Y=0（溶接線中心）近辺にばらつくようにすることが必要である。
- (d) 無欠陥領域数 : 統計的に 29 個以上の無欠陥領域を全て無欠陥と判断することが必要である。なお、上記(a),(b),(c)を考慮すると、150A 試験体×1 体（採点単位:12）、350A 試験体×1 体（180°の範囲,採点単位:15）、600A 試験体×1 体（90°の範囲,採点単位 12）の探傷を行うことで、これらの条件を満たすことができる。
- (e) エコー高さ測定精度 : 6 個以上の反射源（欠陥に限らない）について測定しそれらの標準偏差が 3.8dB 以下であること。このときに評価するエコー高さは、DAC100~120%程度を中心にばらつきを持っていること。
- (f) 反射源位置測定精度 : Y 方向位置については、6 個以上の反射源（欠陥に限らない）について測定し、それらの標準偏差が 3.0mm 以下であること。このときの反射源位置は Y=0（溶接中心）を中心としたばらつきを持っていること。X 方向位置については、5 個以上の反射源について測定し、各々±12.6mm 以内もしくは、欠陥長さの範囲内であること。
- これらを表 5.3-4 にまとめる。

Table 5.3-4 Proposed examination and acceptance standards.

	Item	Requirements	Acceptance standards
1	Test specimen diameter	Max, min and middle	—
2	No. of flawed area (depth >3.2)	Min 6	100% detection
3	No. of flawed area (1.0<depth ≤ 3.2)	1~2	—
4	No. of unflawed area	Min 29	0% false call
5	Measurement accuracy of echo height	Min 6 reflector	Standard deviation ≤ 3.8dB Critical miss ≤ 6.4dB
6	Measurement accuracy of Y position	Min 6 reflector	Standard deviation ≤ 3.0mm Critical miss ≤ 5.0mm
7	Measurement accuracy of X position	Min 6 reflector	error < 12.6 mm or crack length

5. 3. 4 模擬試験における試験技術者の合否

現状の試験技術者が 5.3.3 項で設定した判定基準を準用した場合に合格するかどうかについて、第 3 章で実施したバーチャル UT システムを用いた試験データを基に評価した。なお、試験データは、口径が中口径のみであること、欠陥付与数および無欠陥領域数などは条件を満足していないが、判定基準のみ準用した。簡易訓練の前のデータおよび後のデータをまとめ、必要データ数まで比例計算で拡張して評価した。なお、本試行は探傷を行ったその場で欠陥か否かの判断を求めており、欠陥以外の信号は反射源位置の記録やエコー高さの記録などしていないことから、熟練者であっても間違えやすい傾向がある。

試験技術者別の合否判定結果を、表 5.3-5 に示す。なお参考として、POD のみに着目した評価として POD=1.0 (全欠陥を検出) を適用した場合の合格率も示す。ここで示すように、提案される判定基準を適用した場合、熟練者の場合には合格率 67%、有資格者の場合には 10%となる。一方で POD のみに着目した判定を行った場合には、熟練者の合格率は 100%、有資格者の合格率も 90%となる。このことは、POD にのみ着目した判定では、訓練の効果を識別することはできないが、提案される判定基準を適用することで、熟練者とそうでない者を判別することが可能であると考えられる。一方で誤検出の判定が厳しくなっていることから、熟練者が検査する場合でも、探傷の現場で欠陥か否かを判定することは難し

Table 5.3-5 Admission decision for candidates using virtual UT system examination in case of applying the proposed acceptance criteria.

Candidate ID	Group	Pass/Fail	Major mistake	Pass rate	【Ref.】 Acceptance criteria : POD=1.0	
					Pass/Fail	Pass rate
1-1	High Skilled	Fail	False Call	67%	Pass	100%
1-2		Pass	—		Pass	
1-3		Pass	—		Pass	
1-4		Fail	False Call		Pass	
1-5		Fail	False Call		Pass	
1-6		Pass	—		Pass	
1-7		Pass	—		Pass	
1-8		Pass	—		Pass	
1-9		Pass	—		Pass	
2-1	Just Certified	Fail	False Call	10%	Pass	90%
2-2		Fail	False Call		Fail	
2-3		Pass	—		Pass	
2-4		Fail	False Call		Pass	
2-5		Fail	False Call		Pass	
2-6		Fail	False Call		Pass	
2-7		Fail	False Call		Pass	
2-8		Fail	False Call		Pass	
2-9		Fail	False Call		Pass	
2-10		Fail	False Call		Pass	

く、信号を適切に記録し、反射源位置等の情報を基に評価することが重要であることがわかる。また、有資格者の中で合格した1名は適切に欠陥を検出し、誤検出もなかったことから、適切に信号の判定が可能で、熟練者に近い検査能力を有しているものと考えられる。さらに、第3章でも述べた通りに、資格者であれば欠陥信号の検出は概ね可能だが、熟練者以外は誤検出が多く、対象部や想定する欠陥などに応じた訓練が重要であることを示している。

5. 3. 5 合格した試験技術者が実施した場合のプラント損傷確率の評価

この判定基準を用いて合格した者が、ISIに従事した場合に、システムの破損確率がどの程度の影響を受けるかを検討する。

(1) 合格者の POD 想定

訓練を受講し、達成度確認試験に合格した者の POD およびその変動幅について検討する。

第3章では簡易的な POD 曲線を用いて、概念的に大きな欠陥の検出率とシステムの破損確率について検討を行ったが、実際の POD 曲線は、式 5.3-5 に分布に従うとされていることから(5-13)、図 5.3-9 に示す形状として計算した。図 5.3-9 には、FCR=0.1 で適切に評価された場合の、各欠陥深さの POD 点もプロットしており、それに概ね合致するように各パラメータを調整する。

$$POD(x) = \frac{e^{(b_0 + b_1 \ln(x))}}{1 + e^{(b_0 + b_1 \ln(x))}} \dots \dots \dots (5.3-5)$$

POD を推定するにあたっての条件は以下とする。

- ・適切な手順と適切な機材で、許容可能な環境で探傷を実施する。
 - 充分大きな欠陥に対する POD は概ね 1.0 となる
その POD は 1.0 を中心とし、 $2\sigma = 0.05$ (5%信頼度) の正規分布となる。
 - 深さ 1mm 以下の欠陥は、検出可能な場合もあるが非常に低い確率となる。

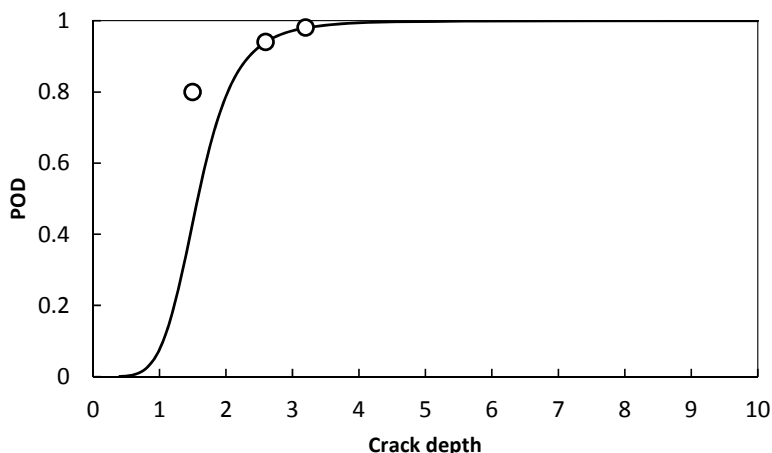
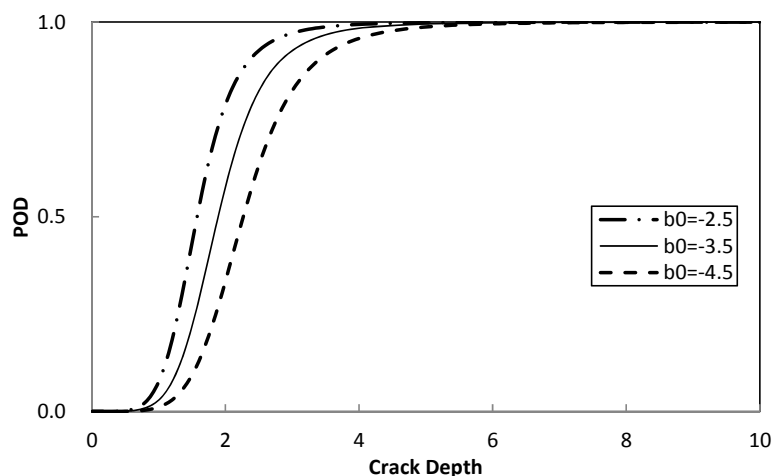
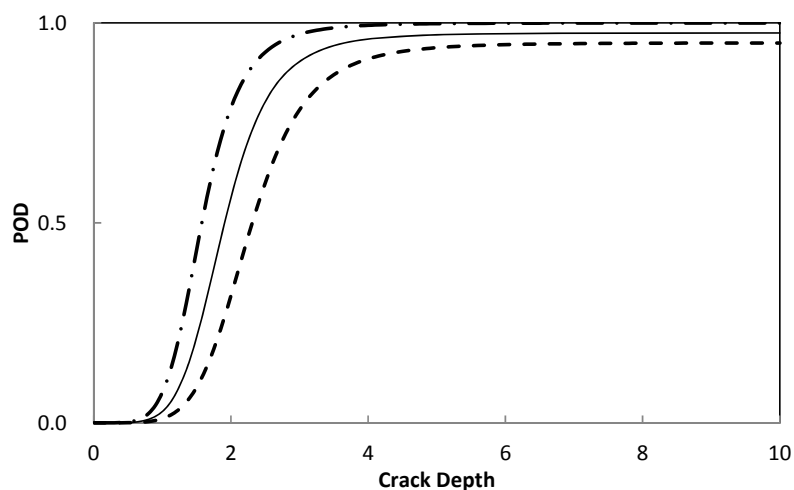


Figure 5.3-9 Estimated actual POD curve of high skilled engineer.

ここでケース1として、式 5.3-5 の b_0 のみを変化させた場合を図 5.3-10(a)に示す。ここで示すように、深さ 1mm 以下の欠陥の検出率は概ね 0 で変化せず、比較的浅い (1mm~3mm 程度) の欠陥で POD を変化させることができる。熟練者の場合の POD 曲線の式は、実際の検出事例を基に近似させると表 5.3-6 に示すように $b_0=-2.5$ となる。達成度確認試験に合格した者は、概ねこの POD を達成していると考えられる。合格基準として大きい欠陥で POD=0.95 を許容範囲としたため、深さ 3.2mm の欠陥で POD=0.95 となる $b_0=-3.5$ までは変動するものと推定し、 b_0 の標準偏差を 1.0 として計算する。すなわち POD 曲線は図 5.3-10(a)の $b_0=-2.5$ を中心として、 $b_0=-3.5$ までを標準偏差 (σ) としたばらつきを想定する。



(a) POD curve case 1



(b) POD curve case 2

Figure 5.3-10 POD curve variation for passed engineer.

Table 5.3-6 Fitting parameter for actual POD calculation.

Parameters	b_0	b_1
High skilled	-2.5	5.5
Standard deviation	1.0	—

またケース 2 として、ケース 1 で想定した POD 曲線のばらつきに加えて、POD 曲線全体が低下する場合を想定する。これは、深さ 3.2mm 以上の欠陥の POD の許容範囲 0.95 以上の合格条件が、深さ 3.2mm 程度の欠陥の POD が低下することによるものでなく、比較的大きい欠陥に対して全般的に POD が低下していた場合を想定したものである。この場合の大きい欠陥に対する POD の低下は、POD=1.0 を平均として、 $2\sigma=0.05$ の正規分布をもつものとして POD 曲線全体に影響を与えているものとする (図 5.3-10(b))。

(2) 系統の破損確率の計算

計算方法は、第 4 章で実施したものと同一計算を行う。すなわち、低炭素ステンレス鋼と鋭敏化ステンレス鋼配管溶接部に発生する SCC を想定し、時間と場所(溶接線長さ当たり)に応じてランダムに SCC が発生する。ISI では 10 年間で継手数の 25% を検査し、欠陥が検出されれば、類似箇所の点検、類似箇所でも欠陥が検出されれば全数点検となる。この考え方に従って計算を実施した。

(3) 計算結果

図 5.3-10(a)に示す POD 曲線とそのばらつきを持った試験技術者が ISI に従事した場合の系統の破損確率について計算した結果を表 5.3-7 に示す。ここで示すように、低炭素ステンレス鋼の SCC を想定した欠陥進展速度を模擬した場合には、 10^7 の試行で漏えいに至るような事象は確認できなかった。また、鋭敏化 SUS304 を想定した欠陥進展速度を模擬した場合には、 10^{-6} 程度の漏えい確率を達成でき、系統の破損確率は充分低く抑えられることを確認した。

同様に図 5.3-10(b)に示す曲線とそのばらつきを持った試験技術者が ISI に従事した場合の系統の破損確率について計算結果を表 5.3-8 に示す。同様に、低炭素ステンレス鋼の SCC を想定した欠陥進展速度を模擬した場合には、 10^7 の試行で漏えいに至るような事象は確認できなかった。また、鋭敏化 SUS304 を想定した欠陥進展速度を模擬した場合でも、 10^{-4} 程度の漏えい確率を達成でき、系統の破損確率は充分低く抑えられることを確認した。

Table 5.3-7 Probability of failure inspected by trained and passed candidate.

Failure mode	Probability of failure
Sensitized Stainless Steel SCC	2.5×10^{-6}
Low carbon stainless Steel	$<10^{-7}$

Table 5.3-8 Probability of failure inspected by trained and passed candidate.

Failure mode	Probability of failure
Sensitized Stainless Steel SCC	1.4×10^{-4}
Low carbon stainless Steel	$<10^{-7}$

5. 4 結 言

ISIに従事する試験技術者の訓練方法、および訓練を実施した後の達成度確認試験の方法および判定基準について検討を行った。

訓練については、信号の判別方法、探傷手順の理解などの知識の習得と、探触子を適切に保持することや、全体を見渡す探傷などのポイント、手順書に従った適切な探傷をスムーズに実施することなどを体得する実習が必要である。

達成度確認については、口径の異なる3種の試験体を用いて、最小で3体（採点領域で36以上）の試験体を用い、無欠陥領域を適切に判断することを主に判定し、信号強度（エコー高さ）、反射源位置（Y位置）の測定精度も評価することで、PODを確認する方法を提案した。

この訓練内容および達成度確認を行うことで、軽水炉のISIにおける系統の破損確率を充分低いレベルに抑えることができる、POD=0.95以上であることを確認し、かつ誤検出に伴う追加点検や工程に伴うコストなどの損失が概ね許容範囲と考えられる、FCR=0.1以下であることが確認できる。

5章 参考文献

- (5-1) 日本工業規格, 「非破壊試験技術者の資格及び認証」, JIS Z2305:2013, 2013.
- (5-2) 一般社団法人 日本電気協会編, 「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」, JEAC4207-2016, 2016.
- (5-3) 平澤泰治, 小林輝男, 牧原善次, 南康雄, 「超音波探傷試験技術者に対する教育・訓練の有効性の検討」, 日本保全学会第 13 回学術講演会 要旨集, 横浜, 7 月 25-27 日, pp.13-17, 2016.
- (5-4) 平澤泰治, 小林輝男, 牧原善次, 南康雄, 「UT 技術者の探傷技量に及ぼす教育・訓練の効果」, 非破壊検査, Vol.66, No.2 pp58-63, 2017.
- (5-5) 東海林一, 林山, 「バーチャル UT システムを用いた検査員の技量向上の検討」, 電力中央研究所 研究報告書, Q16012, 2017.
- (5-6) 一般社団法人 日本非破壊検査協会編, 「[非破壊検査技術シリーズ]超音波探傷試験Ⅲ」, 2001.
- (5-7) Matthew J. Goils, "ASNT Level III Study Guide Ultrasonic Method", The American Society for Nondestructive Testing, Inc, ISBN-10:0-931403-29-4, 2006.
- (5-8) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 「平成 16 年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書 (超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの[総括版]」, 05 基材報-0001(2/2), 2005.
- (5-9) Wickens, T. D., "Elementary Signal Detection Theory", ISBN-10: 0195092503, 2001.
- (5-10) United States Nuclear Regulatory Commissions, "The Technical Basis supporting ASME Code Section XI, Appendix VIII: Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems, NUREG/CR-7165, PNNL-19014, Rev.2, 2013
- (5-11) American Society for Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Appendix VIII, Performance demonstration for ultrasonic examination systems, 2014.
- (5-12) 一般社団法人 日本非破壊検査協会, 「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格および認証」, NDIS0603:2015, 2015.
- (5-13) Department of Defense, "Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment", MIL-HDBK-1823, April 2004.

第6章 結 論

本論文では、軽水型原子力発電所のクラス1配管の非破壊検査に携わる試験技術者の検査能力が、配管の信頼性に影響を及ぼすとされているその要因を調査するとともに、配管の破損確率にどのような影響を与えているのかを明らかにした。またプラントを健全に保つ観点から、試験技術者に求められる検査能力を示した。その上で、プラントの健全性を確認するために必要な検査能力を達成するための訓練方法を示し、訓練を受講した後の達成度確認試験の実施方法と判定基準を示した。また、この試験に合格した試験技術者がISIを実施することで、プラントの健全性を十分なレベルに保つことができることを示した。

第1章では、本研究を実施する背景として、軽水炉の健全性を確認する手順であるISIの位置づけを示し、諸外国では実証制度による信頼性向上策を進めているが、日本国内では熟練した試験技術者がUTを実施することで対応していることを示した。しかし国内の軽水炉稼働状況から試験技術者が経験を重ねる場が減少し、経験者が減少することが危惧されており、これに対して訓練等を通じた試験技術者の技量向上や信頼性確保に関する取り組み状況を示した。すなわち、本研究では"熟練者"の検査能力とは何かを明らかにすること、プラントの健全性を維持するために必要な検査能力を明らかにすること、効率的な訓練内容および適切な訓練実施後の試験（達成度確認試験）を提案することが求められている。

先行研究の結果を整理し、検査能力の指標である欠陥検出確率（POD：Probability of Detection）に関する各々の考え方をまとめ、実際に軽水炉の配管溶接部に対するPOD曲線を推定すると、各々はほぼ同等となることを示した。

また、実際に大規模な検出性試験の結果および実機探傷事例を整理した結果を示し、軽水炉配管溶接部の検査として注目されている、ステンレス鋼配管溶接部の応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）については、深さ1.0mm未満はほぼ検出不可能で、深さ3.2mm以上は概ね100%検出可能であることなどを示した。またこの場合に欠陥以外の信号を欠陥と誤認識する確率（FCR：False Call Rate）については0.1程度であることを示した。

第2章では、第3章以降で試験技術者の技量評価等に活用可能な、配管溶接部の超音波探傷試験を模擬的に行う超音波探傷シミュレータ（バーチャルUTシステム）を開発した。当該システムは、実際の配管溶接部の探傷試験をほぼ完全に再現し、探傷作業を記録することを達成した。使用するデータを編集することで多数の探傷試験を行うことが可能であるため、高価な実際の配管溶接部に人工欠陥を付与した試験体を使用せずに、試験技術者の能力測定や探傷訓練が行えることを示した。さらに当該システムは探傷作業における探触子（センサ）の走査軌跡などを記録することが可能で、試験技術者の作業の特徴等を把握することに有効であることを述べた。

第3章では、熟練者などの試験技術者の検査能力について検討を行った。

第2章で開発したバーチャル UT システムを用いて、ISI 経験が豊富な熟練者と UT 資格は有しているものの ISI 経験のない技術者（有資格者）、UT 資格を有していない無資格者を対象とした探傷試験を行った。その結果では、熟練者と有資格者は欠陥信号をほぼ全て検出可能であったのに対し、無資格者は欠陥の見逃しがあった。すなわち、UT 資格を有している者が ISI を実施すれば、欠陥はほぼ全て検出可能であることを示した。一方で熟練者は欠陥以外の信号（主に溶接部の形状による信号（裏波エコー））を適切に除外することが可能であるが、経験のない有資格者はこれが適切にできなかった。すなわち熟練者と有資格者の大きな差は、信号の判別能力であることを明らかにした。そのほかに探触子（センサ）の走査にあたって、探触子を欠陥に対して適切に保持すること、試験範囲全体を見渡すような探傷と疑義のある部位を重点的に確認する探傷を組み合わせること、などの探傷のポイントを熟練者の探傷作業を解析することで明らかにした。

また実機で実際に検出され、かつその深さが確認された SCC の検出事例と、欠陥ではないが欠陥と混同される裏波エコーの情報を、信号の判別性の観点で統計的に整理した。欠陥であることを判別するにあたって重要な、信号の強度（エコー高さ）と配管軸方向の反射源位置（Y 位置）の 2 つの情報をを用いた分析を行い、これら 2 つの情報を適切に記録し、区分することで、熟練者と同程度の判別が可能で、FCR を 0.1 程度とすれば、POD=0.98 程度の検査能力が発揮できることを示した。

すなわち熟練者が行っている探傷作業は、探傷作業を繰り返すことで得られる特別な能力を有していたり、計測困難な情報を基に判断しているものではなく、定められた検査範囲で適切に探傷を行い、適切に信号を記録し、適切に分類することであることを明らかにした。このことは、熟練者でなくとも UT 資格を有し、日常的に UT 作業を実施している者であれば、ある程度の訓練等によって、適切な信号の記録方法および手順、適切な信号の判別方法を習得することで、熟練者と同程度の欠陥検出が可能であることを明らかにした。

第4章では、プラントの健全性を確保するために、検査能力（欠陥検出能力、POD: Probability of Detection）がどの程度必要であるかを検討した。

発電プラントの通常の ISI を想定し、通常の点検および欠陥が検出された場合の追加点検を考慮すると共に、大きな欠陥であっても POD が 100%にならないようなモデルを仮定し、検査能力がシステムの損傷確率に与える影響について、実際に SCC の検出事例があること、複数の配管口径が混在していることなどから、沸騰水型炉の再循環系配管を例として計算した。議論を簡略化するために POD 曲線も簡略化し、第1章で推定した検査能力を参考に、深さ 1mm 以下は検出できず、ある程度の深さ以上では概ね 100%検出可能とし、その間は直線的に POD が変化する POD 曲線を想定した。SCC は、溶接線長および運転期間に応じてランダムに発生するものとし、溶接残留応力分布および亀裂進展速度については、保守的な値を用いることとした。その結果、低炭素ステンレス鋼の SCC の場合には、非常に悪い

POD の検査を想定しても、 10^7 回の試行でも漏えいに至らないことが判った。進展速度の速い鋭敏化ステンレス鋼の SCC を想定した場合でも、深さ 6mm 以上の欠陥を 0.96 以上の確率で検出可能であれば、系統の漏えい確率は妥当なレベルまで抑えられることが判った。

第 1 章および第 3 章で特定した実際の試験技術者の検査能力を参考に、比較的大きい欠陥とされる SCC 深さを 3.2mm とし、その大きい欠陥の検出能力が系統の破損確率に影響する関係を、同様に計算した。その結果、低炭素ステンレス鋼の SCC を想定した場合には、深さ 3.2mm 以上の POD が 0.90 程度まで低下しても系統の破損確率は 10^{-7} 以下であることが判った。また鋭敏化ステンレス鋼の場合でも深さ 3.2mm 以上の欠陥を 0.95 以上の POD で検出することで系統の漏えい確率を 10^{-3} 以下に抑えることができることを示した。一方で比較的浅い、深さ 1.0mm から 3.2mm までの欠陥検出確率については、鋭敏化ステンレス鋼の場合でも漏えい確率に与える影響は小さいことを示した。

一方で、第 3 章の検討で、POD と誤検出率 (FCR) は互い影響する関係であることが示されており、特に高い POD を要求した場合に FCR も大きくなることが明らかとなった。第 4 章で示された大きい欠陥に対する POD=0.95 は、3.2 節で示した熟練者の検出能力である、ほぼ 100% の POD、3.3 節で示した適切に信号を判断することで得られる POD=0.98、と比較して若干小さい。すなわち 3.2 節、3.3 節で許容されると仮定した FCR=0.1 程度を保った上で、熟練者や、適切に信号が判断できるような有資格者であれば達成可能であるものと考えられる。FCR については系統の破損確率に直接影響しないが、追加の探傷に伴うコストや工程の観点で概ね許容範囲内であると考えられる。

これらの結果から、系統の漏えい確率の観点から期待される検査能力は、深さ 3.2mm 以上の欠陥を 0.95 以上で検出可能であること、深さ 3.2mm 未満の欠陥については、ある程度の検出性があること、誤検出については 0.1 程度が目標となることを明らかにした。

第 5 章では、第 3 章および第 4 章の結果を基に、有資格者に対して効果的と考えられる訓練のあり方と、訓練を実施した後に行う達成度確認試験の内容および判定基準を提案すると共に、これらの制度を適用した場合の検査の有効性について、系統の破損確率を指標として評価した。

訓練の実施内容としては、探触子 (センサ) を想定欠陥に対して適切に保持することや、全体を見通した探傷と疑義のある部位を入念に確認する探傷を適切に行うこと。また信号 (エコー) 判別の方法等を重点的に実施すべきであることを提案した。

訓練を実施した後の、訓練効果を確認する達成度確認試験はなるべく短期間かつ、少ない探傷試験で検査能力を推定することを目標として、表 6-1 に示すような達成度確認試験の実施方法および判定基準を考案した。第 3 章で明らかにした通り、UT 資格を有している者であれば、適切に欠陥信号は検出可能で、検出された信号の強度 (エコー高さ) と反射源位置 (Y 位置) が適切に計測されていれば、適切に信号の弁別が可能であることに基づいてい

Table 6-1 Proposed examination and acceptance standards.

	Item	Requirements	Acceptance standards
1	Test specimen diameter	Max, min and middle	—
2	No. of flawed area (depth >3.2)	Min 6	100% detection
3	No. of flawed area (1.0 < depth ≤ 3.2)	1~2	—
4	No. of unflawed area	Min 29	0% false call
5	Measurement accuracy of echo height	Min 6 reflector	Standard deviation ≤ 3.8dB Critical miss ≤ 6.4dB
6	Measurement accuracy of Y position	Min 6 reflector	Standard deviation ≤ 3.0mm Critical miss ≤ 5.0mm
7	Measurement accuracy of X position	Min 6 reflector	error < 12.6 mm or crack length

る。達成度確認試験では、得られた信号強度（エコー高さ）、反射源位置（Y位置）の計測精度を確認し、第3章で示した検査能力が得られていることを確認し、さらに欠陥信号の判別能力については、欠陥の誤検出（欠陥ではない信号を欠陥と判定する）を基に評価することを主としている。これによって、目標とする欠陥検出確率（POD）が0.95以上であることを確認でき、多数の欠陥を検出させて欠陥検出試験を行う場合と比べて、高額な実機模擬試験体の削減や、試験時間の削減、受験者の負担軽減を達成することができる。

この達成度確認試験に合格した試験技術者がISIに従事した場合の、システムの漏えい確率について、第4章で実施した手法を用いて評価した。低炭素ステンレス鋼のSCCを想定した場合には、漏えい確率を 10^{-7} 以下とすることができ、鋭敏化ステンレス鋼のSCCを想定した場合でも 10^{-4} 程度と十分に低い確率に抑えることができることを確認した。

これらの検討によって、従来は日本国内の軽水炉のISIでは"熟練者"が実施することを前提としていたが、熟練者の検査能力を明らかにし、その能力はプラントの漏えい確率を抑える観点でも充分であることを示した。ISI経験のない有資格者に対して実施する訓練のポイントを明らかにすると共に、その達成度確認の方法および判定基準を提案した。この方法を用いることで、高価な実機模擬試験体を大幅に削減可能とすると共に、試験時間の最小化、受験者の負担軽減を達成しつつ、プラントの信頼性を十分なレベルに保つことができることを示した。

国内で検討が進められている試験技術者の訓練制度の構築に、本研究成果は有効であると考えられる。今後は、本手法を容器などの他の部位や他の損傷にも応用していくとともに、欧米で行われている検査実証制度を簡略化する提案も試みる。

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、懇切かつ粘り強いご指導とご激励を賜った、東京工業大学 工学院 水谷義弘 准教授に心から感謝の意を表します。

本論文中の全ての研究に対し、懇切なるご指導とご鞭撻、また要所で重要なヒントを賜った、東京工業大学 工学院 葭田貴子 准教授に深く感謝の意を表します。

本論文の審査に際して、懇切なご指導並びに有益な御助言を賜りました、東北大学 流体科学研究所 高木敏行教授、東京工業大学 環境・社会理工学院 廣瀬壮一教授、同 工学院 井上裕嗣 教授、轟章 教授、阪口基己 准教授に心から感謝いたします。

本研究は、筆者が勤務する一般財団法人 電力中央研究所で行った内容を一部含んでおり、多大なるご指導およびご鞭撻をいただいた、曾根田直樹 材料科学研究所所長、太田丈児 軽水炉保全特別研究チームリーダー/PDセンター長、秀耕一郎 前PDセンター長、林山上席研究員をはじめとした非破壊検査ユニット各位に深く感謝の意を表します。

本研究は試験技術者の訓練制度を対象としており、制度に関して議論を行っている、一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 構造分科会 供用期間中検査検討会 笹原利彦主査 (株)ND I リサーチ)、高田泰和副主査 (関西電力株)、他各位に感謝の意を表します。また、本研究の重要な要素の一つである実機事例による判定について、現 一般財団法人発電設備技術検査協会 牧原善次研修センター長、小林輝男様他が取りまとめたデータを活用しており、ここに感謝の意を表します。本研究の重要な要素である試験技術者の能力評価において、実際の評価にご協力いただきました非破壊検査株式会社の試験技術者各位に感謝の意を表します。

本論文作成にあたり、惜しめない助力と励ましをいただいた愛妻 久美子と愛娘 希に感謝の意を表します。

本論文は、多くの方々からのご指導、ご激励、ご協力によってはじめて完成したものであり、いずれが欠けても本論文の完成には至らなかったものと思われまます。改めまして関係各位に心より感謝申し上げます。

平成 30 年 2 月

東海林一

Inspection capability of ultrasonic testing examination engineer
and its evaluation process for the light water reactor piping

Hajime SHOHJI