

沸騰水型原子力発電所における ステンレス鋼の応力腐食割れ対策の 経過と教訓(2)

二見 常夫 Tsuneo FUTAMI

ビジネス・ブレークスルー大学院大学 経営学研究科 教授 博士(工学)

解説 記事

2. 低炭素ステンレス鋼の導入とSUS304 製炉内構造物の取替え

2-1) 低炭素ステンレス鋼の導入

定期検査の度に配管等にSCCが発見され、その対応でプラントが長期停止し作業員の放射線被曝線量と修繕費が増大する問題をかかえていた電力会社は、(財)原子力工学試験センターの確証試験結果が出ると、低炭素ステンレス鋼（極低炭素に成分調整した原子力用SUS316およびSUS316L）を工程上間に合うものは建設中のプラントに一斉に導入していった。

低炭素ステンレス鋼が1981年に最初に採用された福島第二原子力発電所2号機（以下2F-2）は建設工事の最盛期にあった。今では考えられないが同発電所ではその頃4プラントが同時に建設中であり、建設が始まったばかりの2F-3、4にもすぐに採用された。建設ラッシュの当時は、GE社の技術といえども必ずしも完成されたものではないことを体験した電力会社とプラントメーカーは、わが国の国情に合った原子力発電所を目指し共同研究を盛んに行い、国産化率を競いながら設計改良や新技術を積極的に開発し採用した時期でもあった。

しかし、極端に言えば鋭敏化さえしなければSCCは発生しないと考えた低炭素ステンレス鋼への過信と間に合えば建設中プラントへもとした急速な導入は、開発過程で確認されていない製造・加工条件を容認することになり、材料変更という最も重要な設計変更管理が不十分だったと言わざるをえない。

こうして、SUS304製配管のSCC対策によく目度がついたとのムードが漂い始めた1990年代前半に、今度はSUS304製の原子炉圧力容器内部構造物（以下炉内構造物）にSCCが発見されその対策に追われる第Ⅰ期の後半が始まることとなる。

2-2) SUS304製炉内構造物のSCCと修理

2-2-1) SUS304製シュラウドのSCCとブラケット工法による修理

1994年に福島第一原子力発電所2号機（以下1F-2）で、関係者にとって大きな衝撃となったSUS304製シュラウド内面のほぼ全周にわたるSCCが発見された。材料の炭素含有量は0.05~0.06%と高めで、典型的な粒界型SCC（以下IGSCC）であった。

シュラウドはまだ構造強度上の余裕を持っていたが、き裂が全周にわたるため、貫通したとしてもシュラウドが原子炉冷却材の流れにより浮き上がり地震によりズレが生じないよう対策を取ることとした。

同じ位置にSCCが発見されたブランズフェリー原子力発電所で、き裂を跨いで当て板を置き上下を4本の

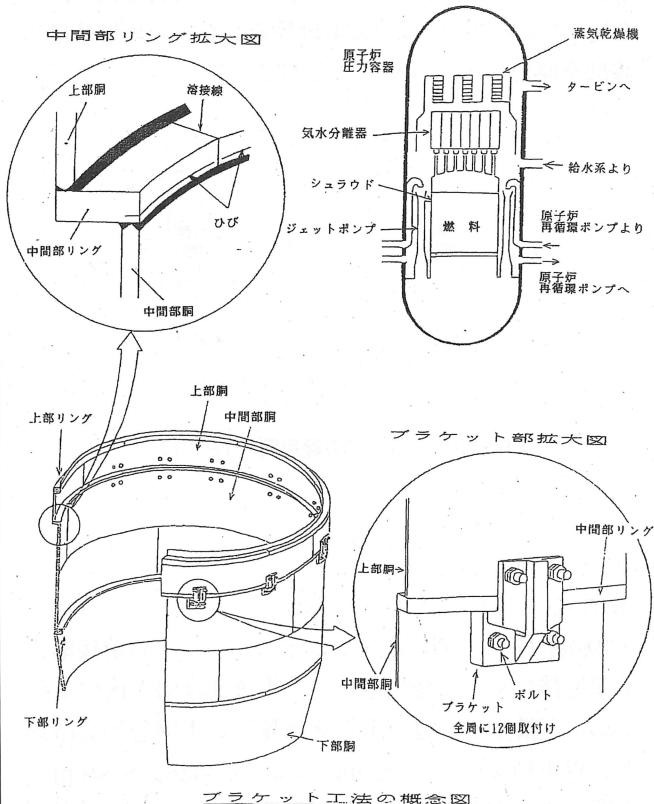


図-1 ブラケット工法の適用例（1F-2）

ボルトで固定するブラケット工法が実施されていたことから、同じ工法が採用された（図-1）^[1]。

ただし、ブラケット工法はボルト穴の削孔等に対する構造上の制約から他の溶接継手部に適用することが難しく、汎用性のある修理工法ではなかった。

2-2-2) 他のSUS304製炉内構造物のSCCとクランプ工法による修理

(a) ジェットポンプ入口配管

1996年に1F-1原子炉圧力容器（以下RPV：Reactor Pressure Vessel）内部のジェットポンプ入り口配管のエルボ溶接継手部近傍にIGSCCが発見された。炭素含有量は0.05～0.07%と高く、割れの様相はモックアップ再現試験結果とも良く一致した^[2]。

当該配管はシュラウドとRPVの間の狭隘な場所（以下アニュラス部）にあり、補修が極めて困難であった。一方、高圧水が配管内を流れるため、万一配管が破断した場合破断口が振れ回り周囲を傷つける可能性がある。このため、両端に締め付け機構を備えた連結機（以下クランプ）を、き裂を跨いで取り付け、き裂が全周にわたって貫通したとしても運転中の地震および冷却材喪失事故時の外力で配管が分離しないように修理した（図-2）。クランプは溶接や穴あけ等をしないため外せば当該部を原形に復帰させることができる。

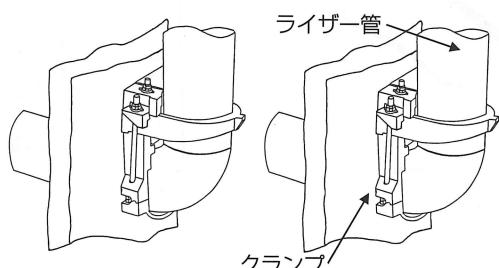


図-2 クランプの適用例（1F-1）

(b) 炉心スプレイ系スパージャ

1993年1F-1の炉心スプレイ系スパージャの溶接継ぎ手部近傍にSCCが発見された。当該部はRPV内の上部にあるが構造が複雑で取替えは難しい上緊急炉心冷却系（以下ECCS :Emergency Core Cooling System）を構成する安全上最も重要な機器の一つであるため、き裂が全周にわたり貫通したとしてもECCS作動時に

分離しないようクランプを取り付けた。この修理は前記2件と異なり最初公表せずに行なわれ、1999年に至って初めて割れを発見しクランプ工法で修理するよう公表した不適切な取り扱いの代表的事例の一つである。

これらの修理箇所はシュラウドの取り替えに伴って全て新しく交換された。

2-3) SUS304製シュラウドの取替え

2-3-1) シュラウド取替えの経緯

運転年数で先行する米国では多数のSUS304製炉内構造物のSCCが報告されるようになって、それ迄のSCCの経験から、GEと同じ材料を使用し同じ設計で製造・建設され同じ運転条件で運転されて来た初期のプラントは、他の箇所にもまたどのプラントにもさらにSCCが発生してもおかしくないと思われた。

まだ米国のように維持規格に基づいてプラントを運用する環境が整わない状況の下、1995年からSUS304製炉内構造物のSCC対策と汎用性のあるシュラウド修理工法の検討が始まり、1996年にはSCC発生を遅らせ進展を抑制する水素注入がまず導入された。汎用性のある修理工法としてはタイロッド工法とシュラウド取替えの技術開発が行なわれ、いずれも適用可能との結論が得られた。一方米国ではシュラウド取替えではなくタイロッド工法、き裂表面に肉盛溶接を行なうバターリング工法などの技術開発が行なわれた。

タイロッド工法は、米国の実績に加え工期も短く費用もはるかに安いがゆえに支持する声も大きかったが、

- ① 炭素含有量に配慮せず製造された初期のSUS304製シュラウドおよび炉内構造物が残ること
- ② 狹いアニュラス部はタイロッドが設置されるのでますます狭くなり、一層検査しにくくなることの難点があった。

シュラウド取替えはこれらの問題がないことに加え炉内構造物に対し次のような徹底した安全確認と対策が行えることから、SUS304製シュラウドについては取り替えることとした^[3]。

- ① RPV内部のSUS304製配管や機器を全て低炭素ステンレス鋼製に取り替えることができる
- ② RPV下部にあり水中カメラのアクセス性が悪くかつ取り替えないNi基合金製構造物を徹底的に点検でき、必要な場合には修理も可能なこと
- しかしながら、世界で実績がない上、以下の技術的

な難題があった。

- ①建設時と同等の品質を確保しなければならないため、溶接と溶接検査を気中で実施すること
- ②工事を完全遠隔自動で行うことは現実的に不可能であり、人がRPV内に入りうるレベルに迄内部の放射線量率を下げなければならないこと
- ③限られた空間に対応した遠隔自動溶接機等各種の遠隔自動機器を開発しなければならないこと
- ④新しいシュラウドの据付精度が制御棒の移動空間精度に直接影響するため、高い精度で新しいシュラウドを据付けなければならないこと
- ⑤作業員の放射線被曝線量を出来る限り低くするよう万全を尽くさなければならないこと。

1996年からBWRの所有電力会社とプラントメーカーで共同研究開発が実施され、開発された技術は(財)原子力工学試験センターの実規模モックアップによる確認試験で確認された。こうして、1997年7月に世界で初めて1F-3のシュラウド取替え工事が始まった^[4]。ほぼ1年に1プラントのペースで取替え工事が実施され、2001年にSUS304製シュラウドを持つ4プラントの取替えを成功裏に終了した。SUS304製シュラウドのプラントを所有する他の2社も取替えを行い、もう1社は今後2プラントで取り替えを行う予定である。また東京電力(株)はSUS304L製シュラウドの2プラントについても取替えを検討している。

シュラウド取替えは、各方面から高い評価を受け、日本原子力学会 技術開発賞(1998年度)、日本機械学会 2001年動力エネルギー部門社会業績賞、(財)エンジニアリング振興協会 エンジニアリング功労者賞(平成11年10月)、日刊工業新聞社 日本産業技術大賞(2002年度)などを受賞している。また、1F-2においては、1999年3月に日本記者クラブの方々40数名をRPV内底部まで案内し、「究極のデスクローダー」としてシュラウド取替え工事の状況をつぶさに観察してもらった^[5]。

それ迄不可能とされ聖域と呼ばれてきた炉内構造物の徹底的な点検、修理および取替えが問題なく可能であることが示されたことにより、経年プラントの安全性和健全性維持に極めて大きな自信を関係者に与えた。

2-3-2) シュラウド取替えの概要

2-3-2-1) シュラウド取替え手順

80万Kw級プラントのシュラウドはRPV内に原子炉

を巻くように設置された直径約5m、厚さ約5cmの円筒である。燃料集合体、原子炉上部構造物を支えるとともに内側を上昇する沸騰水の流路を確保する役目を持っている。取り替え手順は以下の通りである。

- ① RPV内から燃料はじめ取り外し可能な機器を全て取り出した後、内部の化学除染を行う
- ② 古いシュラウドを切断し取り出す
- ③ 取り替える構造物を全て取り出した後、水を抜き、気中でアニュラス部に新しいジェットポンプを据付け、次に新しいシュラウドを据付ける
- ④ RPV内部の配管や機器を据付け、取り外した機器を戻して、取替えが終了する

2-3-2-2) 放射線量率低減対策^[6]

中性子照射を受けたRPV及び炉内構造物は強く放射化しており、さらに内表面に強く放射化したクラッド錆等が付着している。RPV内の放射線量率を通常の放射線管理で作業できるレベルに迄低減することが、シュラウド取り替え工事の成立条件であった。

(a) 化学除染^{[7], [8]}

酸化還元除染法の一つであり、比較的高い除染効率(DF: Decontamination Factor)が得られ廃棄物発生量が少ないと特徴を有するChemical Oxidation Reduction Decontamination法(以下CORD法)を用いた。CORD法は、還元溶解・酸溶解剤であるシュウ酸(鉄酸化物の溶解)と酸化溶解剤である過マンガン酸(クロム酸化物の溶解)を、交互に流すことにより、機器や配管の表面に付着したクラッドを化学的に溶解し、イオン交換樹脂で除去する方法である。廃棄物発生量は、除染剤が紫外線分解処理されるため、他

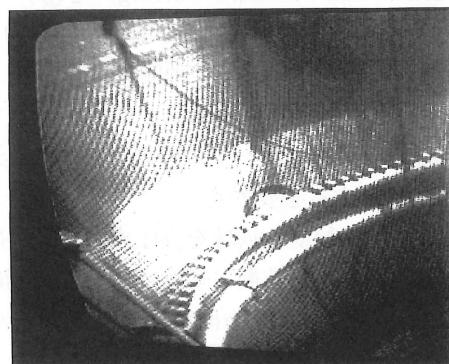


図-3 除染後のRPV内部(1F-3)

の除染方法と比較して数十分の1に低減される。図-3に化学除染後の1F-3のRPV内面の写真^[9]を示す。表面は金属光沢をしており良好な除染結果が得られたことを示している。

(b) RPV内壁遮蔽

RPVフランジから吊下げた厚さ約90mmの遮蔽板でRPVからの放射線を遮蔽する。遮蔽板は鉛またはタンゲステンを入れたステンレス製のシースで、板と板の隙間からの放射線ストリーミングを減らすため、縦端面はL字型で隣と重なるように作られている。

2-3-2-3) 遠隔自動機器の開発

(a) シュラウド切断装置（一次切断）

古いシュラウドは二分割して取り出し、これを一次切断と呼ぶ。上半部の切断には、放電加工（以下EDM： Electrical Discharge Machining）切断装置またはロールカッターを用い、下半部については、残った切断面が新シュラウドとの溶接接合部となることから、精度が高いEDM切断装置を用いた。

EDM切断装置には回転式グラファイト電極および切断粉回収フードが取付けられているが、切断粉特にエアロゾルの100%の回収は困難でありプール水面から出てくるエアロゾルの捕獲に十分配慮する必要がある^[10]。ロールカッターは、円盤状の刃を強く押し付けながら回転させて押し切る装置で、切断粉やエアロゾル等の発生が殆どない。

(b) シュラウドの細断装置（二次切断）

RPV内から取り出した古いシュラウドの細断を二次切断と呼び、水中プラズマ切断あるいは超高压アブレッシブ（研磨材）ウォータージェット切断（以下UHP： Ultra High Pressure Cutting）を用いた。

水中プラズマ切断は、水中にて電極と切断物との間にプラズマアークを発生させて切断物を溶融し、ガスジェットにより除去する。EDMと似てエアロゾルが発生するため、クリーンハウスのようなガス処理設備を水面上に設置する必要がある。

UHPは、1mm程度の鉄球を高圧水に混ぜて吹き付けて研削切断する。短時間に切断できるが、研磨材が全て二次成生物となるため回収処理装置が必要となり、切断作業はRPVに隣接するドライヤー・セパレータピット内で行う。

(c) 新シュラウド自動溶接機

新シュラウドの溶接接合部は溶接入熱量を低減しつつ溶接時間を短縮するために狭開先形状としている。また、溶接接合部は外側にクレビスが残らないよう外側からも溶接を行った後に、内側から従来のように多層溶接を行なう。シュラウド外側のアニユラス部には既に新しく据付けたジェットポンプがあり狭いため、あらかじめフィラーウイヤを外側溶接開先部に張り付けた（置きワイヤー方式）新シュラウドを据付け、ワイヤリールを背負わない超薄型の外側専用自動溶接機を開発し外側溶接を行なった。

2-3-2-4) 新シュラウドの構造

古いシュラウドは板を曲げ加工した半円筒を溶接して円筒に、リング部は板から切出した円弧状の部分リング6個を溶接してリングにし、それらを溶接して製作された。このため周溶接が8箇所、縦溶接が32箇所存在する（1F-3、1F-2、1F-5）。新シュラウドはSCC発生の可能性とISI作業量を減らすため一体鍛造を採用し、溶接線の数を周溶接線が4箇所、縦溶接線が2箇所に削減された。図-4に新旧シュラウドの溶接構造を示す^[11]。また、最新知見を反映し、新シュラウドの溶接継手部には、表面に圧縮残留応力を形成するため研磨あるいはショットピーニングを施した。

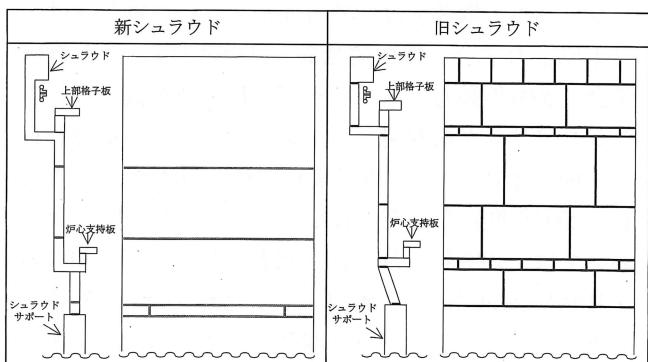


図-4 新旧シュラウドの溶接線比較

2-3-3) シュラウド取替えの実績と評価

2-3-3-1) 工期の実績

原子炉を停止してから再び起動するまでの工期の実績を図-5に示す^[12]。先行機の経験が反映され、

RPVが小さいがゆえに作業条件が悪い1F-1でも1年を切るなど、工期が大幅に短縮されている。



図-5 シュラウド取替え工期の実績

2-3-3-2) RPV内の放射線量率^{[13], [7], [14], [15]}

図-6に2ユニットのRPV内足場上の放射線量率を示す^[19]。作業量の多いRPV下部の線量率0.1~0.2mSv/hは、通常定期検査時の原子炉格納容器（以下PCV: Primary Containment Vessel）内と同程度である。新しいジェットポンプとシュラウドを据付けた後はアニュラス部に水を張ることが可能になるので放射線量率はさらに低くなる。

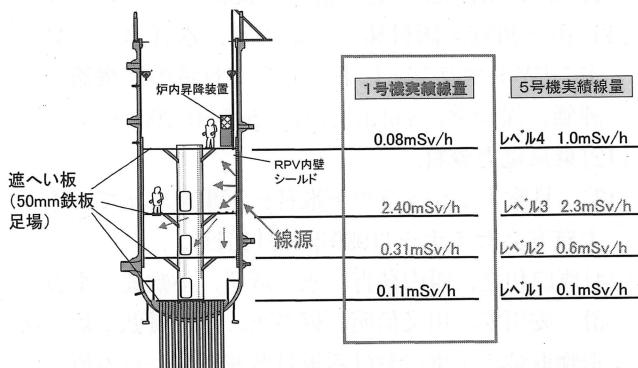


図-6 RPV内の放射線量率の実績

2-3-3-3) 放射線被曝線量^{[7], [14]}

総放射線被曝線量を図-7に示す。最初に取替えを行った1F-3は11.3人・Svで、ジェットポンプの据付作業および二次切断の付帯作業による放射線被曝線量が全体の81%を占めていることが判った。また、付帯作業に50%近い延べ人数が投入されていた。この分析結果に基づき、まずジェットポンプのライザーブレー

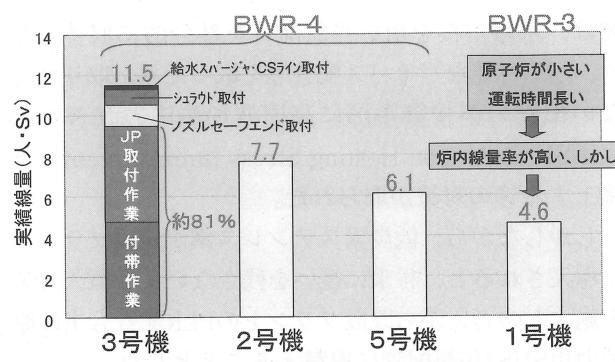


図-7 総放射線被曝線量の実績

ス溶接を手動から遠隔自動溶接に変更した。また、付帯作業については、ドライヤー・セパレータピット内に保管しているドライヤーとセパレータ（取り替え対象ではない）周りの遮蔽を強化し周辺の放射線量率を下げるとともに切断方法をより短時間で切断できるUHP切断に変えた。

これら対策に作業員の習熟効果も加わって、1F-2以降、放射線被曝線量は大幅に低減できた。

次に、作業員の個人放射線被曝線量については、シュラウド取替え工事は機器の据付け、自動溶接機の設定および溶接、溶接検査等非常に高度な技能が必要で、どうしても特定の作業員に頼らざるを得なかったことから最初の2プラントでは25mSvを上限として線量管理を行った。このため1F-3では20mSvを超えた人数が106人で最大値が25mSv、1F-2では20人で最大値が24.8mSvであった。1F-5以降は習熟効果があり20mSv管理にした結果全て20mSv以下に収めることができた。

2-3-3-4) 放射性廃棄物発生量と処理^{[7], [15]}

取り出した炉内構造物からなる放射性廃棄物量は、合計で1F-3が61.8t、1F-2が63.9t、1F-5が62.7t、1F-1が53.2tであった。また、1F-3の化学除染で除去したクラッドの全放射能量は約10TBq、全重量は約72Kgであった。放射能量では全体の65%がCo60で、重量では全体の91%が鉄の酸化物であった。これらを捕獲したイオン交換樹脂は廃樹脂として使用済み樹脂貯蔵タンクに貯蔵・保管された。

2-4) SUS304製原子炉再循環系（PLR）配管の全面的取替え

1970年代中頃SUS304製配管にSCCが発見された当

初は、水冷溶接を用い当該配管を部分的に取替えた
り、削除可能なバイパス配管等を取つたり、取り替え
ない配管の溶接継手部に高周波加熱応力改善工法
(IHSI : Induction Heating Stress Improvement) を
施工する等の対策が取られた。

しかしながら、低炭素ステンレス鋼が建設プラント
に導入されると、将来に憂いを残さないよう恒久対策
を施すとの考えから既設プラントのPLR配管も主に原
子力用SUS316製配管に取替えることとした。

配管の取替えは、古いプラントの大口径管に使用さ
れたシーム管をシームレス管に替える、曲げ管と管台
を一体鍛造とした曲げ管付きT字管に替える、曲げ管
と直管を一体の高周波曲げ管に替える等により、溶接
箇所を大幅に減らし将来の供用期間中検査の作業量と
作業従事者の放射線被曝線量を低減することができ、
さらには配管内面の粗さを改善することによりクラッ
ドの付着を抑制し定期検査時のPCV内の放射線量率を
低減することができる等、放射線被曝低減対策として
もSCC対策に勝るとも劣らない大きな意義があった。

取替え工事では、狭開先自動溶接と水冷溶接による
SCC予防保全対策を施した。作業従事者の総放射線被
曝線量は、2定期検査でPLR配管の全取替えを実施した
1F—5の合計が3.22人・Sv^[16]で、シュラウド取替
えの総放射線被曝線量(図-7)の約50%に相当し、
PLR取替えが大工事であることを示している。

維持規格の整備と運用へ関係者の思いが強まる中、
とにかくSUS304製炉内構造物とPLR配管の殆どを低
炭素ステンレス鋼製に取替えて、プラントを新品同様
に再生できたと思い始めたのも束の間、今度は建設時
に低炭素ステンレス鋼製に設計変更し導入した2Fお
よび柏崎刈羽原子力発電所のシュラウドにSCCが発見
され、SCCとの戦いは第Ⅱ期に入る。

参考文献

- [1]福島第一原子力発電所；25年の歩み－トラブル事例
その原因と対策－、p466(1996).
- [2]日本原子力技術協会ニューシア.
- [3]二見常夫；福島第一原子力発電所における原子炉
圧力容器内構造物の取替え日本機械学会 NEWS
LETTER、No.20, p2-3 (May 2000).
- [4]Yamashita,H., Ohide,A., Miyano,H., Hayashi,K.,
Duink,S., Sagawa,W.; Core Shroud Replacement
Technique & Procedure on TEPCO 1F-3, ASME
ICON-6404 (May 10-14 , 1998).
- [5]小池唯夫；骨太な洞察、構想を一原発炉心の底に
立って思うー；日本記者クラブ会報、第350号、p1
(平成11年4月10日).
- [6]鈴木良男, 志村志男、永山誠司、金崎健、栗林伸
英、梶谷正、内山洋一；大型改造工事における放射
線管理について(最終報告)、日本原子力学会 1998
年春の大会、(1998.3.27 – 3.29).
- [7]Sato,Y., Inami,N., Kurabayashi,T., Kanasaki,T.,
Sakai,T., Wille,H., Fredrick,E.; Chemical Decontami-
nation of Reactor Pressure Vessel and Internals in
Daiichi-Fukushima Unit 3 (1F-3,TEPCO), ICONE6
(May 10-15,1998).
- [8]Makihara,A.; Replacement of Reactor Internals and
Full System Decontamination at Fukushima Daiichi
NPP, 1st EC/ISOE Workshop on Occupational Ex-
posure Management at NPP (Sep.16-18,1998).
- [9]阪本琢哉、藤森昭彦、佐藤博信； 大型改良工事
における放射線管理について[中間報告](2)、日本
原子力学会 1997年秋の大会(1997).
- [10]Pao,T., Shitara,C., Arima,T., Shimura,T.; Cutting
Technique on Core Shroud Replacement of TEPCO
1F-3, ASME ICONE-6406 (1998).
- [11]山下裕宣、岡村祐一、安川宏、水谷淳、二見常
夫；BWRプラントにおけるSCC対策の実機適用と
評価、保全学、Vol.3、No.3、p45-50(2004).
- [12]東京電力資料.
- [13]二見常夫；シュラウド取替え工事を終えて、東工
大核友会セミナー(1999年10月14日).
- [14]原口和之、西内秋吉、永山誠司、小敷健、平賀成
計、安川宏、川又信明、梶谷正、池田賢弘；炉内構
造物取替え工事における線量低減対策、日本原子力
学会2002年春の大会(2002).
- [15]Sato,Y., Sasaki,T., Wille,H.; A Full System Decon-
tamination in Dai-ichi Fukushima Unit 3 (1F-3) for
Replacement of Reactor Core Internals, EPRI Chemical
Decontamination Conference (May 18-19 ,1998).
- [16]東京電力(株)資料.

(平成18年1月26日)