

特集

新生ニッポンを築く新産業創成への挑戦

第II部 新生ニッポンを築く業界構想と溶接の役割

原子力発電(原子力安全推進協会)*

亀山 雅司**



Nuclear Power Supply(Japan Nuclear Safety Institute)*

by KAMEYAMA Masashi**

キーワード 原子力発電, 発電設備, 低合金鋼, 経年劣化, 設備維持, 封止溶接, テンパービード

1. はじめに

最近、ニュースで「原子力」という言葉を聞かない日はない。我々は進退いずれにせよ原子力を今後どの程度利用するかという課題に直面している。

世相は脱原子力に向けた流れが決まったかの感もあるが、エネルギー供給計画の技術的根拠に未知な部分も多い。人類が人工的に手に入れた大規模、安定電源は原子力だけであるから、中長期的にエネルギー危機となれば現状は原子力利用しかない。原子力産業の立ち位置はこれまでも時代の流れで変化している。これについてはこれからも同様であろう。

ただ、3.11に端を発する原子力災害を「体験」した以上、これまでのように推進の賛成と反対に対する感情や意見のすれ違いを棚上げにしたまま前進することは困難となる。そうなれば、歴史にありがちな決断がフリーズしたまま終局を迎えるのでなければ、万人が感情と科学に向き合いながら方策を決めるという、日本人が最も苦手な試練を乗り越えていくことになる。

本件は原子力設備にとってなくてはならない溶接技術の記載を目的としている。しかし、対象としている「原子力」の立ち位置がある程度、明確に掴めなければ読み手にとって本件の技術情報が砂上の楼閣にもなりかねない。

そこで溶接技術に先立って原子力の立ち位置について記載したい。

2. 原子力の立ち位置

2.1 なぜ原子力なのか、の最近の変遷

私が社会人になった四半世紀前には既に石油タイトな時代は過ぎ、エネルギー供給量的に平和な時代に入っていた。安全を大前提として、話題の中心はエネルギーセキュリティとエネルギーコスト、安価な石炭火力に対抗しうるコストについてであった。ただし、そこで議論されたコストは、現在再生エネルギーで取り扱われているようなインパクトのある金額ではなく、その1/10程度、単位は一桁円/kWhであった(詳細は後述)。

3.11直前の流れは環境(二酸化炭素)とそれと同時期に発生した石油価格の暴騰を背景にしている。二酸化炭素の増加は人類の重大な脅威になるという世界的な共通認識が京都議定書等の形で現れ、二酸化炭素の排出の少ない原子力に期待が寄せられた。

原子力は燃焼と異なり、ウラン235等の質量がエネルギーに変換されるので極めて大きなエネルギーを発生する(表現としては「ウラン燃料が燃える」等と言う)。原子力設備の製造やメンテナンスにもエネルギーを必要とするが、原子力による莫大な発生エネルギーを母数にすればそれらはとても小さく、たとえば、原子力発電は発電量あたり二酸化炭素の排出は太陽光発電より少ない。

また、石油価格の暴騰では、石油以外のウラン燃料も含めた「エネルギー資源」がともに高騰したが、原子力は全体コストに占める核燃料費用の割合が小さいことや、一度炉に入れた燃料は3年間燃え続けるため影響が少ないというメリットがあった。そういう面でも原子力に期待が寄せられた。

これらはごく最近の出来事だが既に覚えているの方の方が少ないかも知れない。

*原稿受付 平成24年10月4日

**正員 一般社団法人 原子力安全推進協会 Member, Japan Nuclear Safety Institute

現在は、これらの課題は不問に付されている。ほとんどの原子力発電設備は停止しており、火力発電が増え、二酸化炭素と燃料コストは従来では許容できなかったレベルで増加している。これらは遠からずこれまでの貯え・影響が現れるには時間のずれがあるから、数年かけて環境や経済など様々なバッファを消費してから表面化してくることになるのだろう。

現在の「なぜ原子力か」は存在していない。「なぜ原子力か」が上記のように世相の流れに沿ったものだとすると、世相が脱原子力となれば「なぜ原子力か」が消滅するのはごく自然のことかも知れない。

2.2 今後のエネルギー構成にみるもの

将来の電源構成については政府から3案が出され国民的議論に呈されている¹⁾。そこでは再生エネルギーと原子力の割合を如何にすべきかが問われている。

結果を枝葉を除いて述べれば以下のようにもとれる。

- ・2030年における電源構成で再生エネルギーが最高で到達できるのは35%と想定
 - ・原子力は0-25%
 - ・残りは火力（今後の「火力」の増加はほぼ天然ガスの増加を意味する）
- 再生エネルギーの発電量は原子力の発電量で増減することはない。したがって、コスト的にはおおむね以下の単純な関係が導き出される。
- ・再生エネルギーが増えればその分原子力か火力が減る。再生エネルギーが増えた分は火力か原子力（約7-13円/kWh）の発電単価（図1）が再生エネルギーの単価（約20-42円/kWh）（図2）に置き換わる。二酸化炭素排出について考えると以下の関係になる。

・再生エネルギーが増えればその分二酸化炭素が減る。残りの原子力と火力のうち、原子力を減らせばその分火力が増える（図3）。たとえば、再生エネルギーが35%増えて原子力が25%減ると、差し引き10%の二酸化炭素削減ということになる。再生エネルギーが15%増えて原子力が現在の概ね半分、すなわち15%減ればプラスマイナス0である。

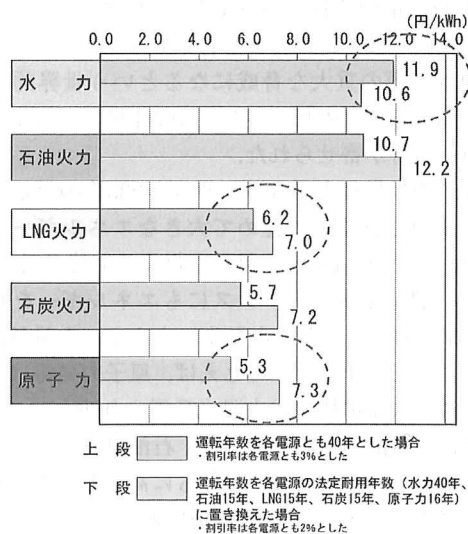
すなわち、二酸化炭素の削減量が実際どうなるかは変動の余地がある程度大きい。再生エネルギーが入った分だけ発電コストが上がることは現状でもはっきり予測できる。なお、だからといって最も安価なものがベストだという前提で条件を判断するべきだと言っているのではない。現状はそういう選択がされたということを理解することが必要なのである。

それにしても気になるのは、「なぜ原子力なのか」でも、「今後のエネルギー構成」の課題でも現在の議論にセキュリティがでてこないことである。すなわち、必要な化石燃料は購入できる、ということが前提となっている。経済力があって平和な世の中だからできる発想かも知れない。

3. 原子力発電設備と溶接技術

原子力発電設備が安全に停止しておくための設備維持が主になるのか、安全に運転していくための設備維持が主になるのか、いずれにしても安全な設備維持のための技術が必要である。設備維持には設備の取替え、部分取替え、または耐圧等の機能回復に着目した工事方法などがあるが、いずれも基本的に溶接で行われる。原子力発電設備の溶接

1キロワットアワーあたり電源別発電コスト（送電端）



<試算の前提>

電源別諸元	運転年数	設備利用率	1基当たりの出力	・平成14年度運転開始ベース ・為替レート（平成14年度平均値） 121.98円/\$ ・燃料価格（平成14年度平均値） 石油 27.41\$/bbl 石炭 35.5\$/t LNG 28,090円/t ・石油、石炭、LNGの燃料上昇率 IEA「World Energy Outlook」
水力	40年	45%	1.5万kW	
石油火力	40年	80%	40万kW	
LNG火力	40年	80%	150万kW	
石炭火力	40年	80%	90万kW	
原子力	40年	80%	130万kW	

<原子燃料サイクルコストの内訳>※

原子燃料サイクルコスト計	1.47円/kWh
フロントエンド計	0.66円/kWh
バックエンド計	0.81円/kWh
再処理（輸送込み）	0.50円/kWh
中間貯蔵（輸送込み）	0.04円/kWh
HLW貯蔵・輸送・処分	0.15円/kWh
TRU処理・貯蔵・処分	0.09円/kWh
再処理デコミ	0.03円/kWh

※運転年数を40年とした場合（割引率3%）

出典：電気事業分科会コスト等検討小委員会資料（平成16年1月）

電気事業連合会「原子力・エネルギー図面集」より

図1 火力発電等の既設電源の発電コスト

が一般産業のものとは異なるのか、または同じなのかについて以下で記載する。

3.1 溶接は要の技術

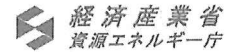
原子力発電設備はタンク、配管、ポンプ等からなっている。高温、高圧条件で使用する例えば原子炉容器は厚さ200mm程度に達する。建設、運転中の設備維持とも溶接が多用されている巨大な溶接構造物であり、溶接は要の技術である。現地の溶接の種類は被覆アーク溶接やTIG溶接

など一般的な溶接方法が多いが、レーザー溶接等が用いられる場合もある。使用する母材及び溶接材料は放射線がないエリアやタービン周りでは炭素鋼をメインにステンレス鋼(308,316)等が、原子炉等があるエリアでは低合金鋼(A533B)とステンレス鋼(308,316)をメインに高Ni合金(Alloy600,690)等が使用されている(図4)。

3.2 材料の放射線影響は限定的

原子力といえば放射線によって特異な溶接条件がある

調達価格・調達期間について



電源		太陽光		風力		地熱		中小水力	
調達区分		10kW以上	10kW未満 (余剰買取)	20kW以上	20kW未満	1.5万kW以上	1.5万kW未満	1,000kW以上 30,000kW未満	200kW以上 1,000kW未満
費用	建設費	32.5万円/kW	46.6万円/kW	30万円/kW	125万円/kW	79万円/kW	123万円/kW	85万円/kW	80万円/kW
	運転維持費 (1年当たり)	10千円/kW	4.7千円/kW	6.0千円/kW	—	33千円/kW	48千円/kW	9.5千円/kW	69千円/kW
IRR		税前6%	税前3.2% (*1)	税前8%	税前1.8%	税前13%(*2)		税前7%	税前7%
調達 価格 1kWh 当たり	税込 (*3)	42.00円	42円 (*1)	23.10円	57.75円	27.30円	42.00円	25.20円	30.45円
	税抜	40円	42円	22円	55円	26円	40円	24円	29円
調達期間		20年	10年	20年	20年	15年	15年	20年	

(*1) 住宅用太陽光発電について

10kW未満の太陽光発電については、一見、10kW以上の価格と同一のように見えるが、家庭用についてはkW当たり3.5万円(平成24年度)の補助金の効果を勘案すると、実質、48円に相当する。

なお、一般消費者には消費税の納税義務がないことから、税抜き価格と税込み価格が同じとなっている。

(*2) 地熱発電のIRRについて

地表面調査、調査井の掘削など地点開発に一件当たり46億円程度かかること、事業化に結びつく成功率が低いこと(7%程度)等に鑑み、IRRは13%と他の電源より高い設定を行っている。

(*3) 消費税の取扱いについて

消費税については、将来的な消費税の税率変更の可能性も想定し、外税方式とすることとした。ただし、一般消費者向けが太宗となる太陽光発電の余剰買取の買取区分については、従来どおりとした。

<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/dl/120522setsumei.pdf>

図2 再生可能エネルギーの買取価格

エネルギー供給問題の本質は変わっていない

日本のエネルギー等自給率 食料をエネルギー換算(変換ロス未考慮)

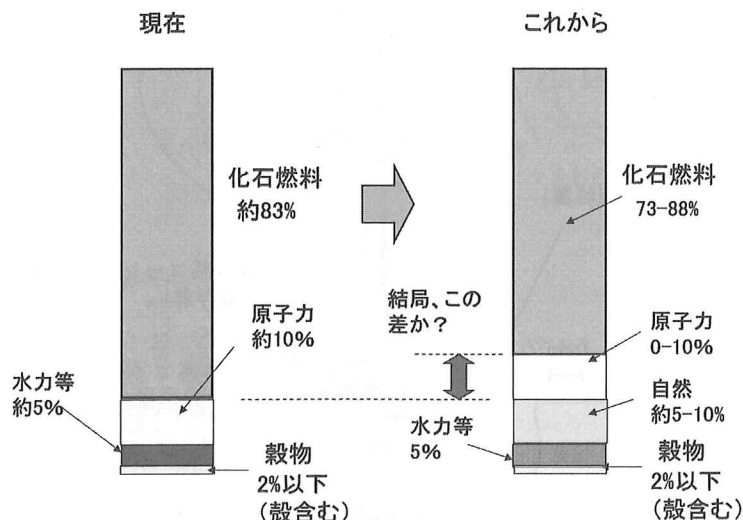


図3 エネルギー供給の課題

と想像する方は多い。しかし、現実にはそういった領域は極めて限られている。例えば、放射線により金属中の原子が変換されてヘリウムが発生する事象がある。ヘリウムは発生しても金属を破壊する程の影響はないが、溶接をすると熔融金属中に泡となって現れ、空隙のある溶接部になってしまう。ただし、この現象が発生する領域は原子燃料を直接保持している炉内構造物等に限られる。これ以外では（硬化の原因は放射線の場合もあるが）硬化した金属の溶接などがあるが、これは溶接の機能上の配慮等が必要なのであって、放射線固有の溶接の問題ではない。

このように、原子力発電設備でもその大部分は普通の溶

接である。

3.3 放射線環境の「施工」の特徴

では原子力発電設備の溶接の特徴は何かと言えば、一つに溶接士の放射線防護がある。設備に比べると人間の放射線の制限は極めて厳しい。原子炉や主冷却材管の近傍等は分単位の管理になる場合もある。放射線管理は5年間の制限等（年あたり50mSv、かつ5年あたり100mSv、実際の管理はこれらに余裕を見て更に低く設定される）もあるから特定の工事で被爆が多いと別の工事に参加できなくなってしまうという制限もある。

また、放射線量が高いから短時間で終わらせなければな

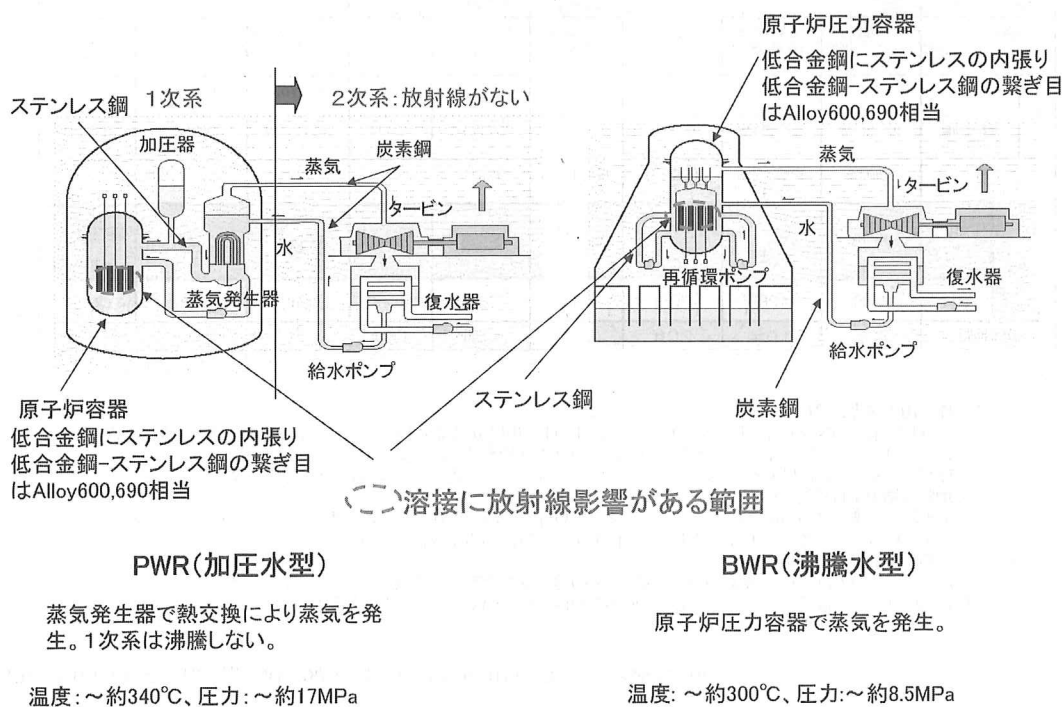


図4 原子力発電設備の概要

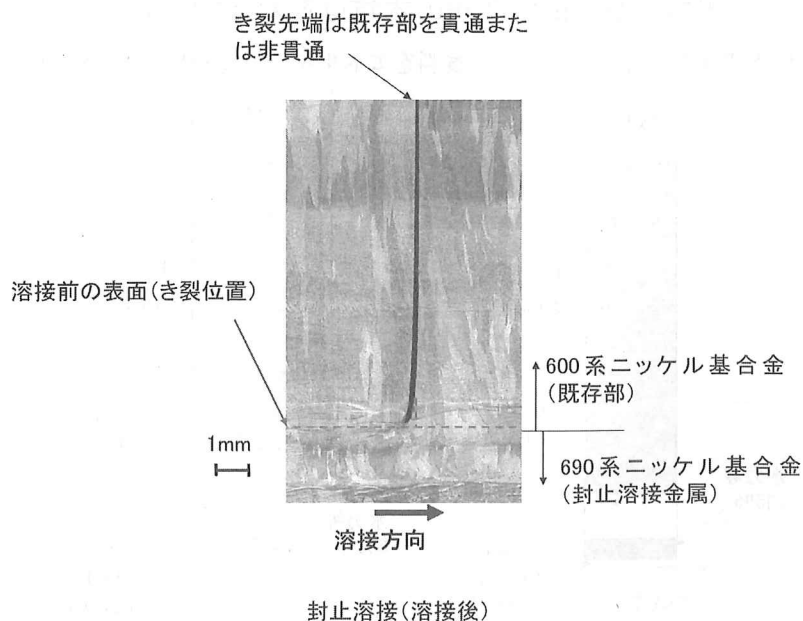


図5 封止溶接の概要

らない、と言った条件がプレッシャーとなり新たな課題が生じる可能性もある。

こういった話をすると「ロボット」を投入すればよい、という意見がでることが多い。しかし、ロボット投入は現地をよく知る人が判断しなければならない。特定の場所の繰り返し作業ではロボットは威力を発揮しやすいが、汎用となると難易度は高い。たまた「図面どおりの寸法で操作してもうまくいかない」などと申し立てる方がいるが、そういうのは大変困る。施工順序や熱収縮等の影響もきちんと計算に入れて寸法を読んで頂くか、現地で誤差をフィードバックするか、様々な不確定な要素に影響されにくい操作方法を採用するか、など図面どおりで済ませることができるとの十分な検討が必要である。

一方で被爆制限等により溶接士が不足している現実があるので、ロボットの潜在的な需要は大きいと言える。施工対象は異なる（土木建築）が福島第一発電所の放射線量の高い現場では重機が遠隔操作で作業されているなど実績も増えてきている²⁾。

3.4 施工後の検査

溶接施工後に行われる検査は大きく2種類ある。一つは施工の良否を判断する完成検査で、これに合格すれば溶接施工は完了、不合格なら手直しまたは再施工となる。もう一つは設備を長期間使用している間に行う供用中検査である。供用中検査は設備全体を対象としているのだが、母材・溶接部のうちトラブルが発生しやすい溶接部近傍が検査対象になっている場合が多い。事実、溶接部の劣化事例は多く、溶接残留応力が原因のことが多い。残留応力は溶接金属部全体を捉えるマクロな見方と、例えば SCC が生じる表面近傍の応力をミクロに捉える見方があり、目的に応じて使い分ける必要がある。また、これらに関連して現地で行える応力計測技術の潜在的ニーズは高い。

3.5 規制関連

原子力は強い規制下にある。その一方、技術基準³⁾や国からエンドースされた民間規格⁴⁾以外からも新規の技術が盛んに実機適用されており^{5), 6)}、他の業界から羨ましがられることがある。技術的な妥当性の証明については実験等の費用が必要であるし、人的費用なども必要である。筆者は過去にそういった費用面で断念された他業界の例も経験しており、技術的な安全性のために費用をかけられるという原子力の利点は大きいと思われる。

また、技術の妥当性の証明をスムーズに進めるためには、開発初期から規制を意識した全体（開発から実用化まで）の計画を持つことが重要である。

ここでは詳細な規制対応の汎用論は述べないが、以下に具体的な施工例で記載する。

なお、許認可の取得、または要求される技術基準に適合することを示す手段は数年単位で流動的に変化しており、状況に応じて対処することが望ましい。

3.6 最近の開発ニーズ

近年開発ニーズが高い溶接技術は封止溶接とテンパービード溶接である。封止溶接（図5）は SCC を耐食性のある金属で溶接し、環境遮断により SCC の進展を止める工法である。封止後の疲労によるき裂進展が目的とする試用期間に余裕があり、また、構造物や封止部の構造強度の要求を満たすことが条件となる。テンパービード溶接は、厚板構造物では所定の温度に加熱することが難しいなど、き裂を除去した後に溶接を行う際に熱処理が困難な場合に用いることができる⁷⁾。

どちらの工法を選ぶべきかについては、両者とも安全上の要求を満たしているのだから、施工者の都合でよい。施工後の検査の継続、取替計画等様々な要因で任意に選択するものである⁸⁾。

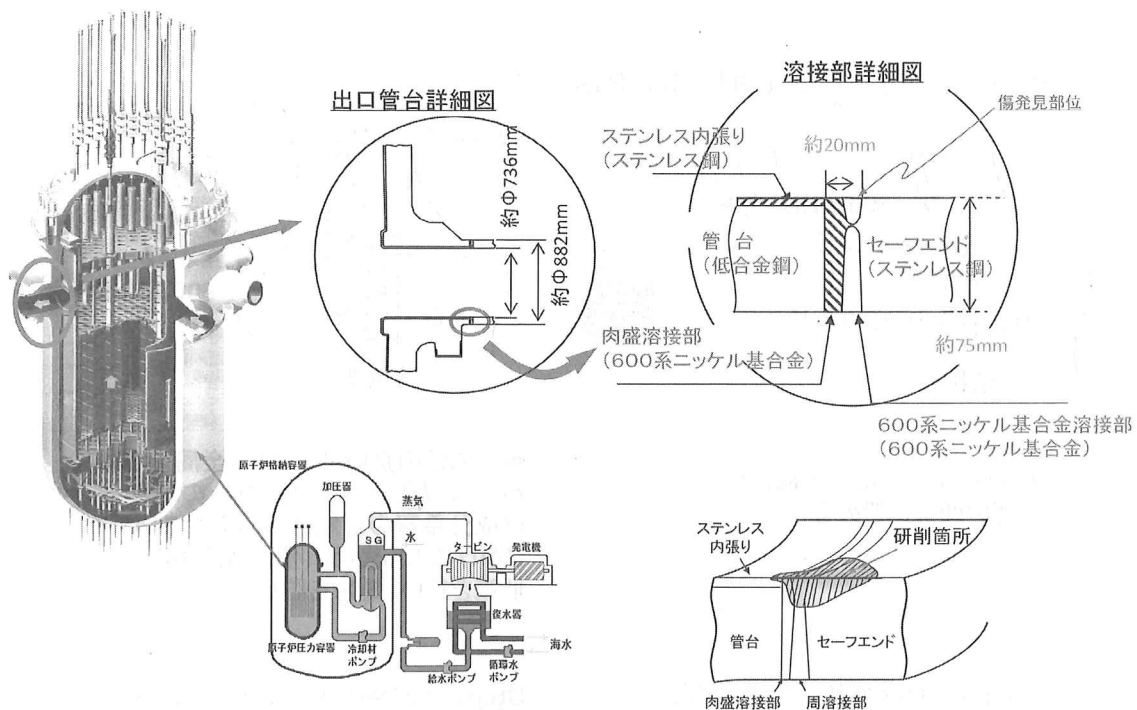


図6 大飯3号機原子炉出口管台の SCC 事例

3.7 施工例

重要構造物の補修の具体例として大飯発電所3号機の原子炉出口管台を以下に紹介する。当件は経年劣化の代表的な例（Alloy600部のSCC：応力腐食割れ）である。この際、低合金部分に及ぶ溶接補修が行われた⁹⁾。

- 1) 平成20年3月、大飯3号機の原子炉出口管台のAlloy600合金にSCCが発見された。出口管台は核燃料で加熱された最も温度の高い（通常運転で概ね320℃）冷却材（水）が流れており、Alloy600はPWSCC（PWRの脱酸素された水：<5ppbで発生するSCC）感受性があることが知られている。
- 2) まずSCCを切削削除している（図6）。削除後はウォータージェット・ピーニング¹⁰⁾により金属表面を圧縮応力化することによりSCCの進展は防止できている。切削削除して当該部の板厚が減るので構造強度上の検討を行う。かつては最小板厚を評価部位全体に当てはめた評価を採用していたため、強度評価が随分厳しくなる傾向があった。しかし、現在はFEM解析が進み、実際の削除部分のみを評価モデルに反映できるようになったため、特に「狭くて深い」凹みは強度上の影響が比較的小さいことを容易に示せるようになってきており、この面でも選択の自由度が広がってきている。
- 3) 当補修工事による復旧目的は圧力を保持する設備強度の維持であるから、SCC削除部はそのままでも、実用上の問題はないと考えられるが、1サイクル運転後にAlloy600で凹部を埋め、表面を690の溶接で覆っている（図7）。なお、1サイクル運転後に施工するのか、当該停止中に施工するのかで補修コストに決定的な差が生じる。1サイクル運転後に施工する場合は、その間にプラントを運転し、溶接装置を製作し、施工工程を検討し、訓練を行うことができるからである。
- 4) 厚板の低合金鋼を後熱処理することが困難であるため、機械特性や溶接部の硬さ等を確認することによりテン

パービード溶接を確立した。基本となるパラメータは単位長さ当たりの溶接入熱と溶着金属量である。溶接入熱と溶着金属量の最大、最小を決め、それぞれの組み合わせで溶接部の健全性が確認し、内挿の範囲で使用する。最大、最小を組み合わせでできる四角の領域は「ヒートボックス」と呼ばれている。なお、最大、最小は限界値ではない。施工条件としたい範囲に運用上困らない余裕を持たせたものとすればよい。

- 5) 技術的妥当性は発電設備検査技術協会に委員会を設置して妥当性の検討と実証を行っている¹¹⁾。これは規制当局によらない民間の活動である。
- 6) 上記をバックデータとして、当技術が技術基準（規制）に適合していることを国に問い合わせ、適合している旨の判断を得ている（ノーアクションレター制度）。なお、規制判断を受ける方法の一つとは限らず、他の選択肢があれば、工事計画から施行終了までを考慮してニーズにあった方法を選択すればよい。例えば、早く結論を得たい、汎用性を認めてもらいたい、客観性を高めたいなど状況に応じたニーズが考えられる。

3.8 プランナーとしての技術者の視点

以上を振り返ると、純技術的な内容は最も大切な要素であるが、許認可の取得や復旧目的といった技術の実現化に必要な事項を含めて、技術全体をプランニングする視点が重要であることに気づく。技術が完成した後に諸事情に合わせるのは大変労力を要するから、最初から諸事情に合った技術開発の計画を持つておくことが望ましい。

これは技術開発の一部であり、現在プランナーという技術者の区分は存在しないが、今後重要性を増す可能性がある。

例えば、筆者は2級ファイナンシャル・プランニング技能士でもあるが、この資格は税理士等の資格が必要な業務はできない。しかし、人生に関わるファイナンス全般を見渡し、どこでいつ誰（どういう専門家）に相談すべきかプランを立てることができるため実用上は大変役に立つ。そ

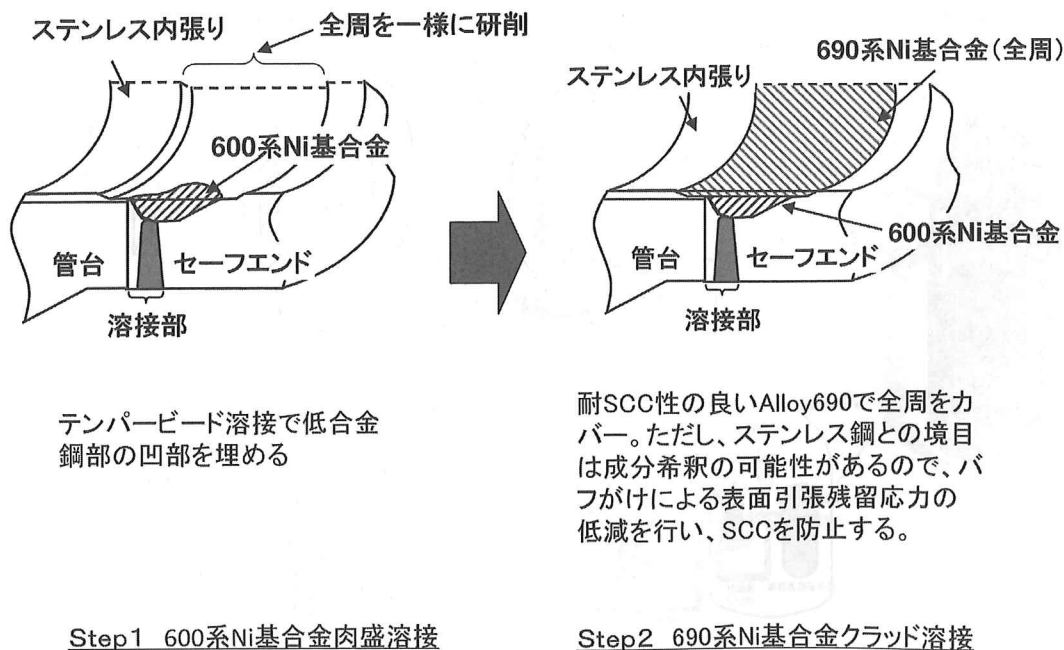


図7 大飯3号機原子炉出口管台の補修

れと似たことが溶接を初めとする技術の分野でも求められているように感じる。

4. まとめと今後

- 1) 原子力発電設備の利用がどの程度になるのか不透明であるが、いずれにしても安全な設備維持のための技術が必要であり、巨大な溶接構造物である原子力発電設備の維持の要となるのは溶接技術である。
- 2) 原子力の重要構造物は厚板の低合金鋼が使用されており、現地の熱処理制限等から本件で取り上げた封止溶接やテンパービード溶接などの開発ニーズがあると思われる。
- 3) 今後は規制庁の発足等により原子力規制の新たな仕組みが動き出すことで、具体的な許認可取得や技術基準適合のアプローチは大きく変化することが予想される。その際、技術的な妥当性の証明をスムーズに進めるためには、開発初期から規制等を意識した全体（開発から実用化まで）の計画を持つことが重要であり、今後、プランナーという技術者の重要性が増すことも考えられる。

参考文献

- 1) 国家戦略室 エネルギー・環境会議，平成24年6月29日資料
http://www.npu.go.jp/policy/policy09/pdf/20120629/20120629_1.pdf
- 2) 鹿島建設株式会社プレスリリース「建設重機10台を遠隔操作できる「無人化施工システム」を開発」，2012/04/18
- 3) 原子力安全基盤機構規格基準部，“発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令と解釈に対する解説”，平成18年1月1日
- 4) 日本機械学会「発電用原子力設備規格溶接規格」(2007年版)
- 5) 日本機械学会「発電用原子力設備規格維持規格」(2008年版) 補修章
- 6) JANTI-VIP-01-第1版 補修工法ガイドライン[封止溶接工法] 平成20年1月
- 7) 三菱重工技報 VOL.43 NO.1: 2006 PWR 原子炉容器出口管台内面クラッディングの実機適用，P4-5
- 8) 大阪大学溶接保全共同研究講座，“溶接補修技術に関する研究”，平成23年9月，第6章
- 9) 平野伸朗他，“原子力発電所における新保全技術としてのテンパービード工法の開発・適用”，保全学，Vol.19, No.4 (2011)
- 10) 加圧水型原子炉（PWR）の長期安定運転を支える保全技術（応力腐食割れ対策技術）P41-44
- 11) （一般財団法人）発電設備技術検査協会確性試験：
<http://www.japeic.or.jp/gyoumu/kakusei/kakusei.htm>