

## 日本の原子炉に導入された一次冷却系部材、炭素異常に関するレビュー

### 第一部 フランスの炭素異常と日本の原子力発電プラントの相互関係

作成：英原子力コンサルタント Large Associates

翻訳、発行：グリーンピース・ジャパン（2016年10月）

#### 要旨

2014年末、フランスの原子力設計・製造会社アレバ社は、原子力安全局（ASN）に対し、フランスのクルゾ・フォルジュ社で製造された部材について実施された材料検査の結果を報告した。これらの検査は、アレバ社が現在フラマンビル3号原子力プラント（NPP）で建設中の欧州加圧水型炉（EPR）の部材に関して、大きく遅れていた *Qualification Technique*（QT）（技術認証）の一環として実施したものである。

驚いたことに、検査結果は、材料特性——とりわけ、衝撃・破壊靱性——が設計基準仕様を満たしておらず、さらに、それは、原子炉容器の上蓋の厚さのほとんどにおいて存在する大きな正マクロ偏析領域で炭素濃度がわずかではあるが、それでも重要な意味を持つ程度に増加していることから来ている。これは、いわゆる「*carbon anomaly*（炭素異常）」で、受容することのできない合金鋼の脆弱性をもたらし、急速な壊滅的破損に至る可能性がある。

このような事実の発覚を受け、アレバ社は、部材の製造における過去の慣行について調べるよう命じられた。驚いたことに、この調査の結果、つぎのようなことが明らかになった。品質保証と部材の適合性に問題がある——とりわけ、部材の製造ルートが QT の対象となっておらず、*Certificate of Conformity*（適合証明書）を取得していなかった——だけでなく、これらの不確実性を持つ部材の製造年は1965年にまで遡り、これらの部材の一部はフランス各地の供用中の NPP に組み込まれているというのである。ASN は、これらの不確実性をまとめて「*irregularities*（不規則事象）」と呼んでいる。

フランス全土で NPP を運転する唯一の会社「フランス電力会社（EDF）」は、直ちに供用 NPP の安全性について評価するよう求められた。EDF の非常に予備的な安全評価報告を2016年6月に受けた ASN は、12基の NPP が危険に曝されていると判断し、これらの NPP を厳格な予防措置的条件下でのみ運転するよう命じた。ANS はのちにこれを撤回し、これら12基の NPP すべての運転を停止するよう命じた。

**日本供給の蒸気発生器部材**：ASN が危険に曝されているとした 12 基の NPP に共通する特徴は、いずれも、日本鑄鍛鋼株式会社（JCFC）——そして、ひょっとしたら日本製鋼所（JSW）——が日本において製造した巨大な鍛造部材を含む取替用蒸気発生器（SG）を使っているという点である。これらの部材——ボトム・チャンネル・ヘッド（水室）、チューブシート（管板）、および頂部楕円形ドーム——はすべて、マクロ偏析領域を持っていると見られており、炭素濃度が高くなっている可能性がある。EDF は最初に、その初歩的検査の結果は最大過剰炭素濃度が 0.3%に達することを示唆していると報告した。これは、設計仕様の 0.22%を約 50%超えるものである。これに基づき、独立のアドバイザー「放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）」は、予定されている運転停止によって日本鑄鍛鋼の部品に関するさらなる検査が実施できるまでは、追加的条件や「補正」措置を実施することによって壊滅的な破損及び燃料溶融のリスクを軽減することが可能と判断した。

**日本鑄鍛鋼ボトム・チャンネル・ヘッド（水室）——過剰炭素**：燃料取替のための運転停止が最初に予定されている NPP は、トリカスタン 1 号及び 3 号機である。これらの NPP における日本鑄鍛鋼のボトム・チャンネル・ヘッドに関する先行的な非破壊検査結果は、驚くべき 0.39%という炭素濃度レベルを示した。最大許容レベルよりほぼ 100%高い数値で、これがもたらす材料強度の低減のため、この部材は高速破壊を非常に起こしやすい。IRSN は、この非常に高い炭素濃度のため、その分析を修正し（2016 年 10 月 18 日）、ASN に対し、日本鑄鍛鋼の蒸気発生器部材が使われている NPP のうち 1 基を除くすべての運転停止を命じるよう勧告した。この運転停止命令は、それぞれの NPP を再稼働してもその安全性が許容レベルにあると EDF が示して見せられるまで続けるというものである。

報告されたトリカスタン 1 号及び 3 号機の非常に高い炭素濃度レベルから言って、運転再開するにはほとんど間違いなく、関連する蒸気発生器——最大で 6 基——を一次冷却水及び 2 次の蒸気側系統から切断して、原子炉建屋から取り出し、特別な重機器工場に運んで相当の修理をするか、廃棄して完全に取り換えるかしなければならないだろう。これらの巨大な 300~400 トンの蒸気発生器の取り外し作業を行い、輸送するというのは、困難で、費用が高み、大変な時間を要する。蒸気発生器の取替えには、少なくとも 1~2 年はかかるだろう。それも、蒸気発生器の余剰製造能力が存在するとしてのことである。典型的な NPP の 3 基の蒸気発生器セットの取替コストは、40~60 日の運転停止の場合、1 億~1 億 5000 万ユーロを超える。ただし、トリカスタン NPP の場合、すでに運転停止中なので、運転停止（発電できないことからくる）コストは、これよりも相当高くなるだろう。日本鑄鍛鋼の蒸気発生器部材を持つ他の 10 基の NPP も許容レベルを超える炭素濃度を示した場合——そうならないと信じるべき理由はない——必要な時間とコストはさらに増大する。とりわけ、問題の 12 基の NPP に必要な合計 37 基の蒸気発生器の修理・取替を可能にする新しい蒸気発生器製造能力が見いだせない場合はそうである。

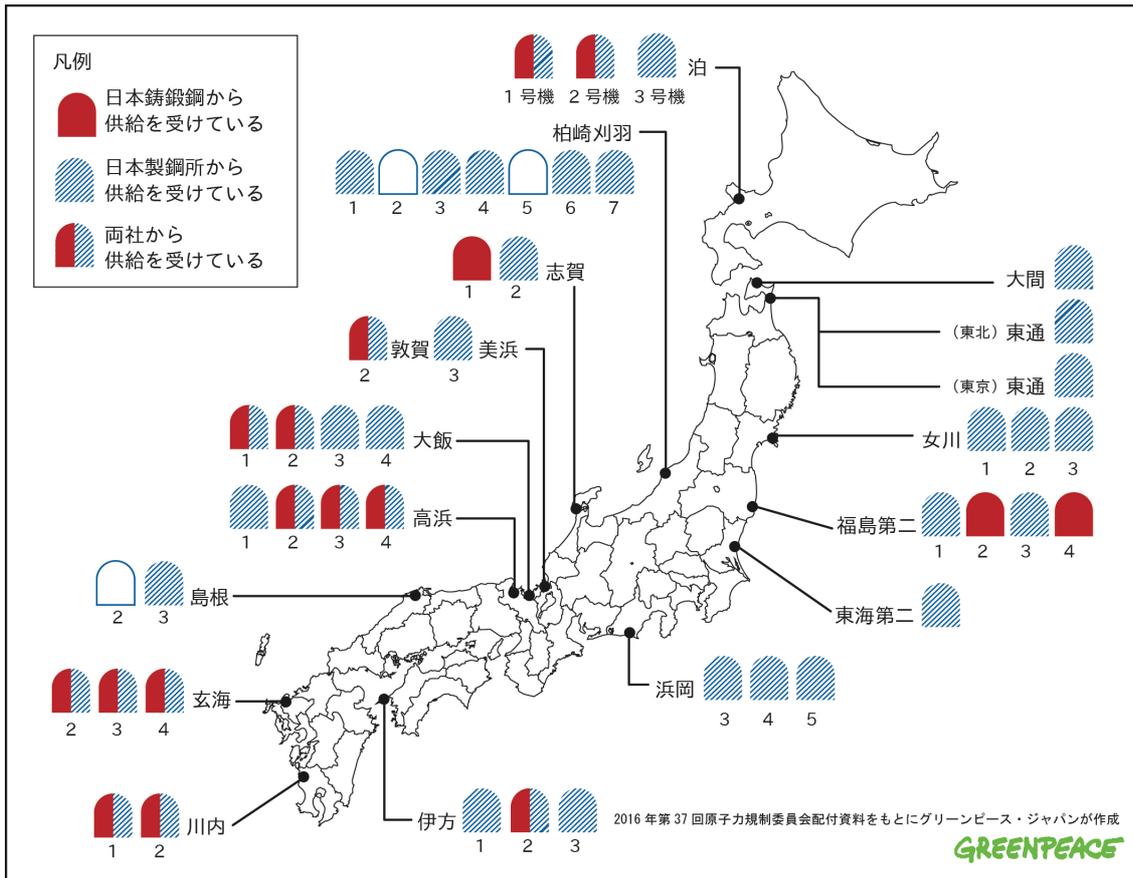
**日本の原子力機器サプライ・チェーン**：本調査報告書では、日本鑄鍛鋼——そして場合によっては、日本製鋼所——がフランスの原子力機器サプライ・チェーンに対し、規則適合部材を提供できていないのと同じことが日本の原子力サプライ・チェーンでも起きている可能性について検討する。理由はいくつもある。

**日本鑄鍛鋼供給部材**：まず第一に、1995年から2006年にかけて、あるいはそのころ、日本鑄鍛鋼が欠陥のある、仕様を満たしていない数多くの蒸気発生器部材をフランスの原子力機器サプライ・チェーンに供給したというのは、紛れもない事実である。このことは、不均一性という点で仕様を満たさない標準以下の材料特性の部材が日本にある日本鍛造鋼の製造施設における品質保証管理を通り抜けてしまったことを示している。これらの品質管理、物理的特性、安全性確認体制は、顧客であるアレバ社または EDF、あるいは両社によって契約により指定され、そして、フランスの原子力安全当局 ASN によって公式に承認されたはずである。

また、日本鑄鍛鋼供給部材がフランスの原子力機器サプライ・チェーンに入り込んでいたこの期間（1995年～2006年）のほとんど全体を通じてフランスの規制の枠組みは変わっていない。従って、アレバ社が部材の仕様を変える理由があったとは考えづらい。最後の年（2005年12月）になって初めて、不均一性の制限の強化が導入されたが、それでも、ASN はこれを2008年まで厳密に施行しなかった。これは、日本鑄鍛鋼によるフランスの契約用の供給が終わってからずっと後のことである。

仕様を満たさない日本鑄鍛鋼の部材がフランスのサプライ・チェーンに入り、すぐには探知されなかったということは、付随していた QT 記録が蒸気発生器のボトム・チャンネル・ヘッドの品質・材料特性を包括的かつ正確に反映していなかったということを示唆しているというのは、紛れもない事実である。同じ QT 記録は日本鑄鍛鋼の製造施設から来ていただろうから、日本鑄鍛鋼自身の品質保証検査をも、探知されることなく、すり抜けたに違いない。

フランスへの供給契約を始める前、1984年から1993年にかけて、日本鑄鍛鋼は同じような蒸気発生器ボトム・チャンネル・ヘッド部材を日本の NPP（高浜 3、4号、川内 2号、敦賀 2号、泊 1、2号）に供給した。鍛造蒸気発生器部材は日本では製造されていないとの原子力規制委員会の主張とは異なり、原子力発電事業者の調査結果報告において製造業者と製造ルートを示した中で使われている用語は、これらの蒸気発生器部材は据込鍛造されており、従って、フランスのものと同じような許容できないレベルの不均一性のリスクを抱えていることを強く示している。



図：日本鑄鍛鋼と日本製鋼所から原子炉圧力容器や蒸気発生器の部材の供給を受けている原発

フランスに供給されたのと似ていて、同様の規格・安全確認体制に従って製造された日本鑄鍛鋼の部材は、日本鑄鍛鋼の品質保証管理ポイントをすり抜ける可能性を持っただろうということになる。さらに、当時（1984～1993年）の日本の規制当局は、いささか動きの緩慢な原子力安全委員会であり、その仲間の原子力安全・保安院（NISA）とともに、組織的に能率的なフランス側当局 ASN と比べて有能だったということ示唆するものは何もない。実際、逆に、いわゆる「規制の虜」という事態によって原子力安全委員会と NISA に対して圧力がかけられたとする逸話がのちにいろいろ出ている。

**日本製鋼所供給部材：**フランスのサプライ・チェーンに対する蒸気発生器部材の供給に関しては幾分の不確かさがある。これらの部材——蒸気発生器の楕円形ドームとチューブシート（管板）——も、ASN によって正マクロ偏析の形の不均一性があり、従って、材料強度の低減のために高速破壊を起こすリスクが高まっていると認定されている。アレバ社はチューブシートと楕円形ドームのレプリカ・サンプルのテストを実施している。どちらも、仕様を満たさない結果が出ているが、現時点では、レプリカが日本製鋼所のものか、フランスの鍛造会社クルゾー社のものかを示す直接的な情報はない。

**日本鑄鍛鋼、日本製鋼所、川崎製鉄の原子炉圧力容器及びその他の部材：**日本の鍛造及び熱間形成部材にはマクロ偏析領域がないとの日本原子力規制委員会の主張は、失礼ながら、

説得力がない。同委員会は例えば、「鍛造工程における品質管理は適切に実施されており、製造記録が品質を裏書きしている」から、リスクは小さいと主張している。

これは、なんとんでも、次の動かしがたい事実を無視している。日本鑄鍛鋼がフランスに供給した 37 基のボトム・チャンネル・ヘッドに関して現在進行している検査が驚くほど高いレベル（規定の 0.22%を超える 0.39%）の過剰炭素の存在を示しているのである。元々の製造記録（試験結果やその他の材質指標を含む）が日本鑄鍛鋼の工場からの搬出前に同社の品質管理検査担当者によって検査されなかったか、これらの記録が部材の品質について包括的かつ正しく記述していなかったか、あるいはその両方である。原子力安全にとって重要な部材の品質と一貫性を保証するために定められた安全確認体制のこのような深刻な違反は、それが過失によるものであれどうであれ、そう軽く扱ってはならない。

また、外部から供給された鋼板の熱間形成で作られた部材に関し、原子力規制委員会は、連続鑄造鋼スラブは本質的に偏析が形成されないと想定しているようだが、中心線マクロ偏析及び亀裂は製鋼所においてよく知られた製造不確実性の一つである。

2016 年 9 月 13 日の発表において原子力規制委員会は、部材の物理的・冶金学的品質を定めた日本の規格に言及し、日本の原子力機器のサプライ・チェーンに入るには部材はこれらの目標となる基準を満たさなければならないと述べている。しかし、同委員会はこれらの部材の製造において獲得できた実際の材料の特性を提示していない。だが、フランスにおける状況は深刻で、それが日本で製造された同様の規格以下の部材に関連していることから、実際の物理的及び品質特性（もともとのテスト及び分析記録）を改めて調べなおすことが急務である。

**調査結果に基づく所見**：本調査報告書は、フランスで議論されている問題で、日本の原子力機器サプライ・チェーンに当てはまる可能性の高いものに関連したいくつかの「所見」を発表する。関係しているのは次の三つの種類の部材である：日本鑄鍛鋼供給の蒸気発生器ボトム・チャンネル・ヘッド；日本製鋼所提供の可能性のある蒸気発生器チューブシート及び楕円形ドーム；そして、もっと一般的には、加圧水型炉及び沸騰水型炉の原子炉圧力容器、それに、加圧水型炉の加圧器を構成する鍛造物である。

**日本鑄鍛鋼の加圧水型原子炉用ボトム・チャンネル・ヘッド**：基本的には、これらの蒸気発生器部材の製造ルートに関する調査結果報告における日本の原子力発電事業者らによる用語及びその使用の一貫性についてさらなる説明が必要だが、それはおくとして、状況証拠は、フランスのサプライ・チェーンに入ったものと同じく、これらのボトム・チャンネル・ヘッドが据込鍛造されたことを強く示唆している。この可能性のため、そして、とりわけ、日本鑄鍛鋼の QT 記録がどういうわけか、フランスに入った欠陥のある部材が探知

されることなく日本鑄鍛鋼工場から搬出されることを許したことに鑑みて、これらの日本の NPP に組み込まれている部材すべてを、原位置非破壊検査することが望ましい。

**日本製鋼所の加圧水型炉チューブシート及び楕円形ドーム：**これらの部材は、原子力発電事業者の調査結果報告において明確に触れられていない。これは、とりわけチューブシートに関しては驚くべきことである。チューブシートは、原子炉の一次冷却系の加圧境界の一部をなしているからである。チューブシートと楕円形ドームの両方に関して製造ルートについてのさらなる情報が報告されるべきである。

非破壊検査のためにチューブシートの上部表面（アレバ社の試験的検査において過剰炭素が検出されたところ）にアクセスする方法を開発・実証する必要がある。これが不可能だとすると、蒸気発生器の取替が必要とみなされる段階に至った NPP から蒸気発生器を取り出してチューブシートを切り取ることが現実的だろう。しかし、このオプションについては、取替用蒸気発生器が入手できるようになるまで NPP を運転することのリスクを正当化することが必要となろう。

**加圧水型炉及び沸騰水型炉の原子炉圧力容器などの鍛造・熱間形成板部材：**これらの部材のそれぞれに関する QT 記録について——とりわけ、鑄塊切り捨て過程に関する——さらなる情報が必要である。フラマンビル 3 号機（EPR）圧力容器の上下のヘッド〔上蓋及び下鏡〕部材に関する最近のフランスの経験は、鑄塊の切捨て工程のあとのどの過程においてもマクロ偏析の存在を意識的に探すということがなされなかったことを示唆している。その背景にある間違っただけの想定は、すべての正マクロ偏析は切捨てによって除去されたというものである。

すべてのドームシェル〔円蓋〕（原子炉圧力容器のヘッドなど）の QT 記録は、テスト・リングの結果への過度の依存について綿密に調査すべきである。EDF は、テスト・リングはマクロ偏析の典型的な部位と比較的離れた位置から来ているため、部材の主要部分を代表するものではないとして、その結果への依存を信用していない。鋼板の熱間形成によって製造された部材に関しては、中心線マクロ偏析及び亀裂の有無について連続鑄造板のミル記録を調べるべきである。

**独立の評価：**フランスでは、欠陥のある部材の存在は規制機関の相当の関心を呼んでいる。なぜなら、まず第一に、深刻な、そして潜在的に重大な原子力安全問題が関わっているからである。第二に、規制の抜け穴が暴露されることになったからである。

これまでのところフランスで発見されている欠陥を持つ日本鑄鍛鋼の蒸気発生器ボトム・チャンネル・ヘッドは、原子炉の一次冷却系においてクラス 1 の機能を果たすものである。「*break-precluded item*（破壊除外品目）」であるため、高速破壊による壊滅的破損は許

されない。なぜなら、サイト外の放射能被害が重大で耐え難いものになりうるからである。フランスの原子力機器サプライ・チェーンに入っていることが判明した欠陥のあるチューブシート——日本製鋼所が供給した可能性がある——もまた、クラス1の機能を果たすものである。チューブシートの破損もサイト外への相当の放射能放出と被害をもたらさう。

規制の抜け穴が暴露されたことの意味は、これらの部材がどういうわけかフランスのサプライ・チェーンに受け入れられてしまったということである。そして、これが発生したということは、欠陥のある部材がどういうわけか日本製鋼所の品質保証管理と安全確認体制をすり抜けたということである。

言い換えると、フランスでの問題をもたらしたこの組み合わせは、全面的に日本で発生した二つの要素を含んでいる。i)欠陥のある部材は、全部が日本で製造された。ii)欠陥部材が製造場所から出ていくのを防ぐべきだった品質管理保証体制が機能しなかった。日本の原子力機器サプライ・チェーンへの侵入を防ぐ最後の防波堤は iii)日本の規制システムである——以前は、信用の失墜してしまった原子力安全委員会と NISA がこれを運営していた。フランスでは、この最終的防波堤も機能しなかった。

ジョン・ラーヂ

**JOHN LARGE**

**LARGE ASSOCIATES**

**CONSULTING ENGINEERS, LONDON**

