

(解説)

金属スクラップを用いた放射性廃棄物処分容器用内容器の製造に向けた技術的課題の検討

長江拓哉*・宮田賢作・中山準平

Study of Technical Issues on Manufacturing Inner Containers of Radioactive Waste Disposal Container Using Metal Scrap

Takuya NAGAE・Kensaku MIYATA・Junpei NAKAYAMA

要旨

原子力発電所で発生した金属廃棄物のうち、クリアランス制度の適用が可能なものは再利用することが望ましい。金属スクラップの再利用方法の一つに放射性廃棄物処分容器の内容器用材料に使用する案がある。内容器の製作においては遮へい性能、強度、耐久性の観点から所定の品質を満足する製作方法を開発する必要がある。そこで、金属スクラップを原料とした再利用品の品質を確認するために -20°C シャルピー試験を実施した。その結果、不純物元素の中でりん(P)や硫黄(S)は-吸収エネルギーを有意に低下させることが確認された。また、溶接による熱影響部の吸収エネルギーの変化や、適用可能な熱処理条件について、模擬試験体および汎用衝撃解析ソフトを用いて検討した。

Abstract

Among the metallic wastes generated at a nuclear power plant, it is desirable to reuse those to which the clearance system is applicable. One of the proposed methods of recycling such metal scraps, or so-called clearance metals, is to use them for the inner containers of radioactive waste disposal vessels. In manufacturing an inner container, it is necessary to develop a manufacturing method that satisfies the specified quality in terms of shielding performance, strength, and durability. Hence, a -20°C Charpy test was conducted to confirm the quality of recycled products made from clearance metal. The results indicated that P and S, among other impurity elements, significantly reduce the amount of absorbed energy. In addition, changes in absorbed energy in the heat-affected zone caused by welding and applicable heat treatment conditions were examined using simulated test pieces and general-purpose impact analysis software.

キーワード

廃止措置、処分容器の製造方法、金属再利用、クリアランス、放射性廃棄物、強度評価

ま え が き = 資源小国である我が国においては、高効率かつ低炭素である原子力発電はベースロード電源として1960年代から開発が進められてきた。初期に建設された原子力発電所のなかには老朽化などの理由によってその役割を終え、運転を停止して施設を解体・撤去する措置（以下、廃止措置という）が実施されているものがある。我が国においては廃止措置の実績はまだ少ないが、今後廃止措置に進む発電所は2019年12月現在で26基^{1), 2)}あり、今後さらに増加すると予測される。また、廃止措置の進捗とともに放射性廃棄物の発生量が増加することも予測され、その処分が課題となっている。発生する放射性廃棄物のうち、放射能濃度が低く人の健康への影響がほとんどないものは、国の確認を受けることにより一般廃棄物として再利用または処分できる。この制度を「クリアランス制度」という。金属スクラップを再利用すれば最終処分する放射性廃棄物量が減り、資源を有効活用することができる。

そこで本稿では、金属スクラップを放射性廃棄物処分容器の内容器として再利用する方法について、これまでの検討状況を示すとともに、今後の展望について紹介する。

1. 廃止措置と金属廃棄物

原子力施設の廃止措置では、解体作業において大量の廃棄物が発生する。発生する廃棄物は金属と非金属に大別される。さらに金属廃棄物は、配管や鉄筋のような単純かつ小型なもの、蒸気発生器やタービンロータのような大型機器に分けられる。

大型機器に共通する特徴は、高重量で寸法が大きくかさばる点にある。これらを解体作業現場や事業用地に保管した場合は広いスペースを専有する。また、容易に移動させることもできないため、解体作業の障害となる。省スペースで保管できるよう機械的に小さく切断することは可能であるものの、切断作業にかかる時間的・人的負担は無視できない。以上のように、金属廃棄物の搬出・処分は廃止措置における重要な検討課題の一つである。

2. 金属廃棄物のクリアランス制度

金属廃棄物は、放射性物質の濃度が規制値以下であれば「廃棄物」ではなく、有価な「スクラップ」として扱うことが可能である。すなわち、放射性物質に対する規

* エンジニアリング事業部門 原子力・復興センター 技術部

制体系から除外して金属原料としてさまざまな製品に造り替えることが可能である。前述したクリアランス制度を適用可能な金属廃棄物をクリアランス金属という。

金属廃棄物を放射性廃棄物として廃棄する場合、一定の基準を満たすよう専用の処分場に廃棄体として埋設する必要がある。このため、一般の廃棄物と比較して搬送や処分にコストがかかってしまう。さらに再利用可能な金属資源を埋設処分してしまうため、環境への負荷も増大する。

クリアランス制度はコストや環境負荷の面で有効な選択肢の一つとして期待されている。今後増加する金属廃棄物を滞りなく処理するためにはクリアランス金属の再利用が広く普及する必要がある。そのためには、放射性物質の管理技術や金属製造技術を開発・改善していくことはもちろん、安全に再利用できた実績を積み上げていくことが重要である。

3. クリアランス金属の再利用

3.1 金属スクラップの再利用

クリアランス金属のリサイクル過程は、放射能汚染されていない一般の金属スクラップの再利用と同様である。一般の金属スクラップは回収された後、切断または破碎処理によって取り扱いやすいサイズに分割、分別される。これが電炉メーカーなどへ引き渡され、溶解、精錬などのプロセスを経て鋼材などに加工される。安定した品質の金属スクラップを大量かつ安定して確保することが難しいため、建材のような厳密な品質を求められない資材として再利用されることが多い。

3.2 金属スクラップからの製造方法

金属材料を製造する方法は鋳造により製造する方法と、鋳造の後にさらに鍛造する方法がある。鋳造は溶融した金属を鋳型に流し込んで凝固させる手法であり、鍛造は金属をハンマなどで叩いて成形する手法である。

金属スクラップの再利用という観点では、形状や材質の異なるスクラップを配合することから、安定した品質の製品を得るためには工夫が必要である。すなわち、密度や強度、耐久性といった観点で所要の品質を有する製品を得るためには、スクラップを配合して不純物を平均化するプロセス、あるいはスクラップを精錬して不純物を除去するプロセスなどの組み込みが考えられる。鍛造と比べて鋳造の場合、製造工程のなかでこれらのプロセスを組込むことが可能である。また、後述する内容容器は廃止措置の進捗に伴って発生する廃棄物を収納するため、長期間にわたって大量に製造する必要がある。この点においても、鋳型を使用することによって同一形状の製品を大量に安価に生産することのできる鋳造が最適であるといえる。

3.3 内容容器としての再利用

放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物の二つに分類される。低レベル放射性廃棄物にも、L1廃棄物と区分される比較的放射能濃度の高い廃棄物があり、管理に注意を要する。そこで、廃棄物が発生してから処分場へ搬出するまでの間、遮へい機能を有す

る内容容器に廃棄物を収納しておくことが考えられる。この措置によって搬出までの一時保管を安全に実施することが可能となる。

そこで当社は、金属スクラップを内容容器へ再利用するために必要な材料の化学成分、強度、製造方法の検討を行った。次章以降でその概要を述べる。

4. 内容容器に求められる要件

内容容器に収納する低レベル放射性廃棄物の性状、内容容器の使用環境および適用法令などを調査し、内容容器に求められる技術要件を以下のとおり整理した。

- (1) 遮へい材として使用できる遮へい能力を持つこと
- (2) 予測される温度変化の範囲（ $-20\sim 38^{\circ}\text{C}$ ）において、き裂や破損などの生じる恐れがないこと
- (3) 処分容器に収納可能な寸法であること

以上の要件を満足するため、衝撃吸収エネルギーを低下させる不純物（りん（P）、硫黄（S）など）の上限設定や、衝撃等を受けた際に健全性を維持できるように角部の設計を工夫する必要がある。

5. 内容容器用材料の規格化に向けた検討

金属スクラップを再利用して製造される内容容器は、遮へい材として求められる遮へい能力および耐久性を有する必要がある。そこで、金属スクラップを原料として所要の品質の内容容器が製造できるよう、化学成分を調整して試作した材料の各種試験データを採取し、材料規格案の根拠を得ることとした。

5.1 化学成分

内容容器の一部を模擬した鉄鋼品（以下、試験片という）を製造し、熱処理条件と機械的性質（ -20°C シャルピー吸収エネルギー、以下吸収エネルギーという）との関係を調査した。図1に示すとおり、低合金鋼は冷却速度が遅い場合でも安定して高い吸収エネルギーが得られている。いっぽうで、炭素鋼は焼入れなどによって冷却を速くすることで吸収エネルギーを向上させることができる。

PやSのような不純物はその含有量によって鋼の靱性（じんせい）を劣化させる傾向がある。また、銅（Cu）やすず（Sn）は、溶解炉で精錬しても除去することは

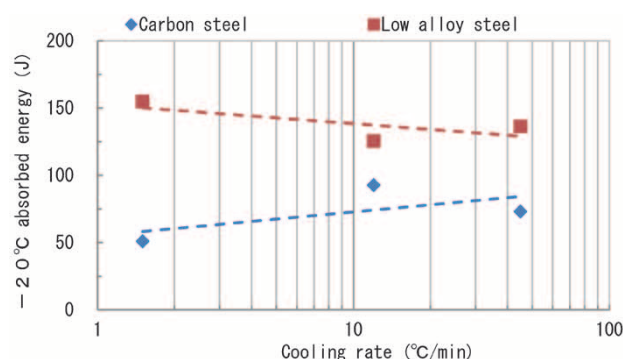


図1 -20°C シャルピー吸収エネルギーと冷却速度との関係
Fig.1 Relationship between -20°C Charpy absorption energy and cooling rate

容易ではない。そこで、これらの不純物元素の含有量が機械的性質に及ぼす影響を確認するため、不純物元素を意図的に添加した試験片を製造して低温衝撃吸収試験を行った。表1にその結果を示す。CuおよびSnは除去が容易でないものの、多少含有される場合であっても低温吸収エネルギーに与える影響は顕著ではない。PおよびSは含有量の増加に伴って低温吸収エネルギーに著しく影響を及ぼすため、含有量の上限值を設定する必要がある。

そこで、P、Sの含有量を変化させた試験片を製造し、材料試験を実施した。鋼種は炭素鋼と低合金鋼とし、不純物含有量を変化させてシャルピー衝撃試験を実施した。その結果を図2に示す。不純物元素が吸収エネルギーに与える影響は鋼種によらず同じ傾向であり、P、S含有量が多いほど吸収エネルギーは減少することが分かった。

金属スクラップにはクロム (Cr) を含むステンレスなども含まれるため、配合されるスクラップの種類によってはCrが材料の物性に影響を与える恐れがある。そ

表1 不純物元素が衝撃吸収エネルギーに与える影響

Table 1 Influence of impurity elements on low temperature impact energy absorption

Impurity element	Additive range (%)	Influence on mechanical properties
P	0.010-0.040	Increasing of impurity elements decreases absorbed energy
S	0.005-0.040	Increasing of impurity elements significantly decreases absorbed energy
Cu	0.10-0.50	No noticeable effect
Sn	0.005-0.030	No noticeable effect

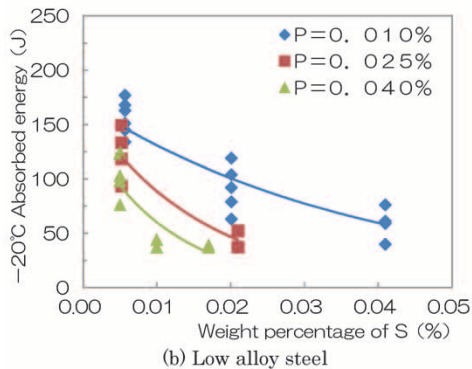
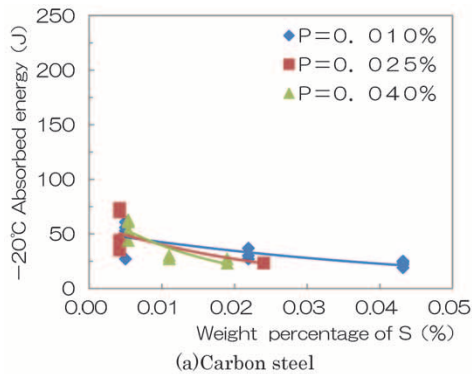


図2 不純物含有量と-20°Cシャルピー吸収エネルギーとの関係
Fig.2 Relationship between amount of impurity element and -20°C Charpy absorbed energy

こで、炭素鋼および低合金鋼についてCr含有量と吸収エネルギーとの関係を調査したところ、図3に示す結果が得られた。

炭素鋼では、試験範囲内でのCr含有量の変化では有意な変化は見られなかった。いっぽう低合金鋼では、Cr含有量の増加に伴って吸収エネルギーがわずかに低下した。また、いずれの場合も低炭素化(炭素量0.05%以下)した場合には吸収エネルギーは大きく増加した。これはフェライト量の増加によるものと考えられる。

5.2 機械的性質

内容器(図4)の耐久性評価に必要な物性データを取得するため、炭素鋼鋳鋼品および低合金鋼鋳鋼品の母材と、その補修溶接部および蓋溶接部(図4のA部)とを

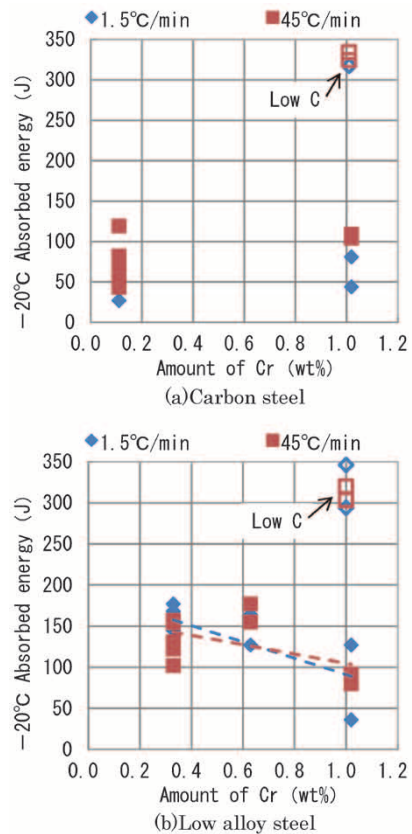


図3 Cr含有量と-20°Cシャルピー吸収エネルギーとの関係
Fig.3 Relationship between amount of Cr and -20°C Charpy absorbed energy

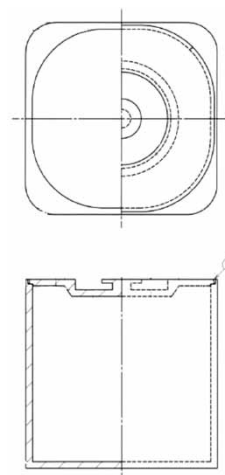


図4 内容器概形図
Fig.4 Schematic of inner container

模擬した試験片を対象にシャルピー衝撃試験を実施した。以下にその試験結果の概要を示す。

- (1) 低合金鋼の吸収エネルギーは、蓋溶接部および補修溶接部ともに、溶接金属、BOND部（溶融金属と母材の境界部分）、HAZ部（母材における溶接の熱影響を受けた部分）の順に高くなった。
- (2) 炭素鋼の吸収エネルギーは母材が最も低かった。
- (3) 低合金鋼の母材、蓋溶接の溶接金属、未溶着部、HAZ部、補修溶接の溶接金属およびHAZ部を対象に破壊靱性試験を実施した。その結果、蓋溶接の溶接金属が最も低い値を示し、動的破壊靱性試験では最小値 $53 \text{ MPa}\sqrt{m}$ であった。また、母材の動的破壊靱性値の最小値は $72 \text{ MPa}\sqrt{m}$ であった。
- (4) 炭素鋼の母材、蓋溶接の未溶着部、溶接金属、HAZ部および補修溶接のHAZ部を対象に破壊靱性試験を実施した結果、蓋溶接の未溶着部が最も低い値を示し、動的破壊靱性試験では最小値 $50 \text{ MPa}\sqrt{m}$ であった。また、母材の動的破壊靱性値の最小値は $51 \text{ MPa}\sqrt{m}$ であった。

5.3 数値解析による耐久性検証

内容器は衝撃等を受けた場合でも破壊されないことが求められる。そこで衝撃・構造解析ソフトウェアLS-DYNA[®]を用い、内容器（蓋溶接部を含む）を対象とする落下衝撃時の応力解析を実施した。内容器の材料は炭素鋼および低合金鋼とした。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 容器の板厚によって結果が異なり、200 mm厚容器は低合金鋼でも炭素鋼でも蓋溶接部からの脆性（ぜいせい）破壊は生じない。いっぽう、50 mm厚容器では低合金鋼で脆性破壊が生じる結果であった。しかしながら、容器形状を変更することによって発生応力は低減し、脆性破壊を防止できることが分かった。
50 mm厚容器を角部から落下させた際に生じる相当塑性ひずみのコンター図を図5に示す。
- (2) 脆性破壊に対する母材の許容欠陥寸法は、炭素鋼で11.4 mm、低合金鋼で15.6 mmと推定される。いずれの欠陥寸法も非破壊検査で検出できる寸



図5 LS-DYNA[®]による容器の落下解析結果（相当塑性ひずみコンター図）

Fig.5 Dropdown analysis result of container by LS-DYNA (plastic strain contour diagram)

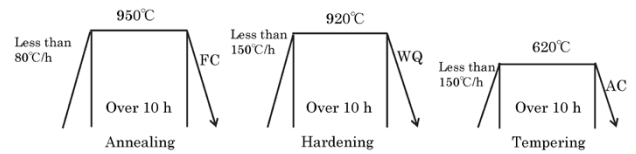


図6 模擬試験体の熱処理条件
Fig.6 Heat treatment conditions of test piece

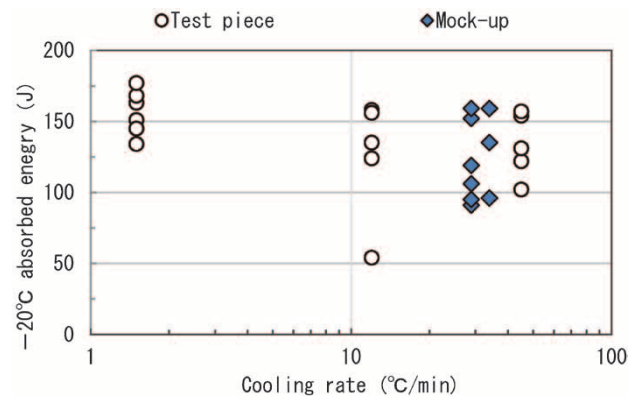


図7 試験片と模擬試験体との比較（低合金鋼）
Fig.7 Comparison of laboratory experiments and test pieces (low alloy steel)

法（脆性試験用試験体の最大製造欠陥サイズは2.6 mm）より十分に大きく、製造欠陥から脆性破壊に至る危険性は低いと思われる。

5.4 製造方法の検討

試験片と比べて実際の容器は形状が複雑であり、厚さ／深さ方向に対して熱履歴が異なる。そこで、5.1節から5.3節の評価結果が妥当であることを検証するため、内容器の形状を模擬した図4と同様の模擬試験体を試作し、図6に示す熱処理条件の妥当性を評価した。

冷却速度と吸収エネルギーとの関係を図7に示す。吸収エネルギーにはそれぞれの値にばらつきがあるものの、おおむね試験片で確認された値が得られている。

- (1) 内容器の代表する位置での焼入れ冷却速度は、試験片で実施した熱処理と同等である。
- (2) 模擬試験体による試験結果より、冷却速度と低温吸収エネルギーの関係はそれぞれの値にばらつきがあるが、おおむね試験片で確認された値が得られた。したがって、5.1節から5.3節の評価は妥当と考えられる。

むすび＝原子力施設で発生する金属スクラップを再利用することは、廃止措置を円滑かつ経済的に遂行するために重要である。

本稿に示した試験結果に基づいて、一般社団法人日本鋳鍛鋼会より『JCSS C1 (2019) 低温溶接構造用鋳鋼品』が発行³⁾されており、内容器に適用可能な材料の規格化が完了した。これにより、金属スクラップが原料であっても、原子力施設で使用可能な製品が製造できる基盤が整った。

今後は内容器の詳細設計や運用方法等が整備され、再利用が実施されることが期待される。

なお、本稿に添付した図表は参考資料⁴⁾の記載内容を基に作成した。

参 考 文 献

- 1) 資源エネルギー庁. 日本の原子力発電所の状況.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf. (参照2019-12-24).
- 2) 原子力規制委員会. 廃止措置中の研究開発段階発電用原子炉.
https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/reactor/haishi/sochichu_kenkai.html. (参照2019-12-24).
- 3) 日本鑄鍛鋼会. 日本鑄鍛鋼会規格(JCSS・JFSS)について.
<http://jscfa.or.jp/doc.php>. (参照2019-12-11).
- 4) ㈱日本製鋼所ほか. 原子力発電所等金属廃棄物利用技術開発3ヵ年研究成果の取りまとめ.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2017/27-29fy_kanri_kinnzoku_torimatome.pdf. (参照2019-12-13).



長江拓哉

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター 技術部



宮田賢作

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター 技術部



中山準平

エンジニアリング事業部
原子力・復興センター