講演

原子力機器材料の開発の歩みと今後の展望 —室蘭から世界へ

(株)日本製鋼所 室蘭製作所 佐藤 育男

本稿は日本原子力学会「2006年秋の大会」の記念講演の内容をまとめたものである。「2006年秋の大会」は北大で開催され、北海道も原子力関連で頑張っているところを紹介するために「室蘭から世界へ」というサブタイトルをつけた。

室蘭製作所は、白鳥湾と呼ばれる天然の良港の地に民間最大の兵器会社として、主に砲身と防弾鋼板を国産化するため、1907年に創業を開始した。写真は、大正10～15年当時に製造された軍艦用41 cm 榴弾砲の砲身である。終戦後の民需転換に伴い、これらの製造技術が原子力機器用材料等(特に高品質鍛鋼品)の製造へ受け継がれた。

近年、世界各国では地球温暖化対策およびクリーンエネルギーとして原子力発電の役割が再評価され、「原子カルネッサンス」の声が大きくなってきている。新規原子力発電所建設が始まっているこの時に、安全と信頼が不可欠である機器材料の開発の歩みを振り返り、更なる信頼性向上へとつなげる材料製造を考えてみたい。

I. 原子力機器材料の推移と実績

昭和30年代に日本でも原子力発電導入の機運が高まり、英国で開発された「コールドーホール型のガス冷却炉」の採用が日本の第1号商業炉として決定した。原子炉容器の材料は約100 mmのMn鋼で英国/スコットランドで製造されたが、日本での検査で「割れ状欠陥で不良」と判断され全数廃却ということになった(日本原子力学会誌, Vol 33, No. 6(1991),「温故知新」参照)。代品については当所の防弾鋼板の製造実績から資格判定審査を経て、全数要求品質を満足し製作された。これが当所にとって初めての原子力用材料の取組みであった。この原子炉は出力16万kWで、その後の原子力発電所の大型化に伴い、鋼板ばかりでなく、多くの鍛鋼品を世界各国の原子力発電所向けに納入してきた。第2図に原子炉等1次系機器用材料(主に鍛鋼品)の納入実績を示すが、国内発電所59基、世界17カ国、153基の発電所で使用されるまでに至っている。この図に示すシェアは、当社の製品が使用されている発電所基数を、全発電所で割った値として算出した。

第1図 大正15年製造の榴弾砲(410 mm ϕ ×18.450 mm^L)

1. 原子力発電所の単基容量の増大と今後の計画

原子力発電所の単基容量は約40年の間に急速に巨大化し、現在、BWRでは改良型BWR(ABWR)は135万kW、またPWRではEPR(欧州型PWR)が開発され、160万kWまでに達してきている。第3図に、発電単基出力と炉心領域の容器寸法を示す。炉心領域には継目溶接のない一体鍛鋼リングが採用されてきているが、その径および板厚は大きさを増してきている。国内の今後の建設中および計画中においてもBWRはABWRへ、PWRは改良型(APWR)が検討されてきている。

欧州においても、フィンランドはEPRを建設中であり、フランスはEPRの着工を決定した。EPR用大型フ

The Course of Development of Material used for Nuclear Steam Supply System Component and the Future Prospect ; To the World from Muroran : Ikuo SATO.

(2007年 1月10日 受理)

第2図 原子炉等1次系機器用部材の納入実績(2006年8月現在)

第3図 発電出力と原子炉炉心領域の容器寸法の関係

レンジを第4図に示す。

また、米国においても2005年8月に包括的エネルギー法案の可決に伴い、新規原子力発電所建設計画が出てきており、2010年着工、2015年運転開始を目標に電力各社が活動を開始している。炉型としてはABWR、ESBWR、AP-1000、US-EPR等があげられている。

また、中国においても第2.5世代と呼ばれている100万kWクラス(CPR、CNP型)および第3世代と呼ばれているAP-1000、EPR等を候補として2020年までの計画が出されている。原子力カルネッサンスと呼ばれる状況が具体化されつつある。

第4図 EPR用RPV/ノズルシェルフランジ

【600 t 鋼塊】
(径4.3 m 高さ4.3 m)

第5図 大型鋼塊形状の推移

2. 原子炉压力容器用材料

原子炉压力容器用材料は、強度と強靱の要求、被検査性、溶接性および中性子劣化の少ない等要求品質を満足すべく、現在の軽水炉においてはMn-Mo-Ni系低合金鋼が適用されている。また、単基出力の増大、建設工期短縮および供用期間中検査(ISI)の削減という点から、大型化、長大化、一体化および鍛鋼化への材料開発は重要である。

大型鍛鋼品を製造するための鋼塊の大きさの推移を第5図に示すが、現在は世界最大の600 t 鋼塊が2次系の一体型低圧ロータシャフト用も含めて多く製造されている。

Ⅱ. 大型化、一体化鍛鋼品の製造技術

前述してきた大型化、一体化を実現するために、高品質な鍛鋼品の製造技術が開発されてきたが、その一部を以下に紹介する。

1. 溶解・精錬・造塊技術

鋼塊内の偏析や空隙の生成は大型化によって凝固時間が長くなるほど顕著になる。したがって、高品質の大型鍛鋼品の製造には、不純物元素、非金属介在物などを低減するとともに、偏析、空隙などの生成を抑制した健全な鋼塊の製造技術の確立が重要である。

当社は、1980年から取鍋精錬技術を開発し、従来の電気炉精錬と真空鋳込との組合せによる2回精錬、2重脱ガスを可能にした。第6図に、溶解・精錬・造塊技術の変遷を示す。取鍋精錬技術の適用は、第7図に示すように極低リン(P)、低硫黄(S)をも可能とし、さらに材料

の高靱性化に大きく寄与してきている。現在、取鍋精錬の処理能力は600 t までに至っており、このことがRPV用大型・一体化鍛鋼品の開発を成功させている。

2. 鍛造技術

鍛錬工程では、鋼塊の凝固組織を高温拡散と塑性変形を利用して消滅させるとともに、鋼塊内部に形成される空隙を圧着し、健全な内部性状を得る必要がある。当社では、1940年に運転を開始した10,000 t 水圧プレスで2003年に14,000 t プレスにリニューアルし大型鍛鋼品の需要に備えた。大型RPV部材の一部は、プレス内での鍛錬は困難な形状にまで大型化したために、1972年にプレス機外で鍛錬を行う装置が開発された。第8図に、プレス機内および機外鍛錬の状況を示す。この技術によって、RPV用リング材の大径鍛鋼品の製造が可能となった。

3. 熱処理技術

大型鋼材の内部品質と機械的性質は熱間加工後の熱処理によって大きく左右される。熱処理工程は焼きならし・焼戻しと焼入れ・焼戻しの2段階で行われる。特に、焼入れ・焼戻しは所定の強度や靱延性等の機械的性質の付与を目的とするもので、これらは化学成分や結晶粒度および冷却速度等の関数として決定される。大型RPV部材の焼入れ・焼戻しは、径9 m、高さ6 mの円形ガス炉と径9 m、深さ6 mの強制循環水装置付き水槽によって実施される。第9図にABWR・RPV部材/炉心領域胴の焼入れ状況を示す。

4. 機械加工技術

当社は、施盤、横中繰り盤など計100台を超える加工機械を備えている。大型RPV部材は、径8 mのターン

(～1979年)

(1980年～)

第6図 溶解・精錬・造塊技術の推移

(特徴)

1. 従来技術の特徴

- 1) 電気炉での酸化・還元連続精錬によりリン(P)、硫黄(S)成分の低減が困難。
- 2) 真空処理は鋳込み時の1回のみ。

2. 取鍋精錬炉の特徴

- 1) 2回精錬によるリン(P)、硫黄(S)の低減が可能。
- 2) 二重脱ガス(真空処理)による $[H_2]$ 、 $[O_2]$ の低減が可能。

↓
高純度鋼の製造が可能

(原子炉圧力容器炉心領域用)

P: 中性子照射脆化元素
S: 非金属介在物生成元素

第7図 不純物P、S含有量の推移

テーブルを持つNC装置付きの超大型堅施盤にて加工される。ABWR・RPV部材/下鏡ペタルは、内外に10個のノズルが一体化された製品であり、ノズル間およびノズル部の最終加工はNC加工となる。CAD-CAM化の採用により、プログラムの精度および加工精度が向上している。第10図に、下鏡リングの機械加工状況を示す。

Ⅲ. 大型鍛鋼リングの代表的実績

第11図に大型鍛鋼リングのエポック的な代表実績を示す。1969年に国産初の敦賀1号機向鍛鋼フランジ、1972年には西ドイツPWR用に、外径5mを超える一体鍛造リングのベッセルフランジが、機外鍛錬法を用いて製造された。

また、1980年に敦賀2号機120万kW PWRに一体鍛鋼リングが採用され、1989年には110万kW BWR一体鍛鋼リングが採用、おのおの炉心領域に継目溶接のない構造となった。

1991年は、ABWR用鍛鋼リング(ノズル一体型下鏡リング)、2004年にEPR用大型フランジがそれぞれ600t鋼塊から製造された。

Ⅳ. 今後の展望

原子力発電も第3世代へと進むなかで、更なる安全性の追求と供用期間増加を考慮された炉が計画されている。また、第4世代として高温ガス炉、高速増殖炉、核融合炉の開発も進められつつある。このような状況の中、高品質な大型化、一体化鍛鋼品の需要はますます増加すると思われる。材料メーカーの役割として以下の項目を精力的に推進し、もの造りの基盤を構築したい。

プレス機内鍛錬

プレス機外鍛錬

第8図 プレス機内・機外鍛錬状況

第9図 ABWR/炉心領域胴の焼入れ状況

第10図 ABWR/下鏡リングの最終機械加工

年	代表的実績	トピックス	年	代表的実績	トピックス
1969	敦賀1号機 鍛鋼フランジ	国産初のRPV用鍛鋼品	1989	1100Mwe BWR用鍛造シェル	① 炉心領域に溶接線が全くない ② A-BWRの先行機として評価
1972	西独PWR 鍛鋼フランジ	① 機外鍛錬法の工業化 ② 400TON鋼機より製造 ③ Biblis B以降のプラントへ継続 ④ 胴も鍛造化	1991	1350Mwe ABWR用鍛造リング	① ノズル(10ヶ)一体型 ② 600TON鋼機より製造
1980	国産1200Mwe PWR用鍛造シェル	① 炉心領域に溶接線が全くない ② 敦賀2号機以降のプラントに継続 ③ 全湯取鋼精錬適用(これ以降のプラントに適用)	2004	1600Mwe EPR用大型フランジ	① ノズルセットオン型 ② 600TON鋼機より製造

第11図 原子炉圧力容器用大型鍛鋼リング材の代表的実績

「物づくりの土壌から輩出される人材，そして継承されてきた技術・技能が，最先端の原子炉や発電所の鍛鋼製品を生み出しているのである。一番大事に継承してきたのが，日本古来より培われてきた鍛刀技術と，日本人ならではのものづくりのアイデンティティである。これが国際競争力の源となっている。

第12図 鍛刀所および鍛錬工場での作業(物づくり白書(2005年版))

- (1) 技術・技能の伝承
 - ・物づくりへの「こだわり」と「よろこび」
 - ・技術 No. 1 への追求
 - ・人材の育成，空洞化(ワイングラス型，砂時計型)対応
 - ・製造実績の継続
- (2) 品質保証システムの維持，向上
 - ・製品品質の確保
 - ・海外規格への取組み
- (3) 開発・改善の促進
 - ・材料開発(高靱性化，高強度化)
 - ・新型炉，次世代炉への対応

最後に，2005年版物づくり白書に紹介された鍛刀所と鍛錬工場を取材した写真と記述を第12図として紹介し，終わりとする。

著者紹介

佐藤育男(さとう・いくお)

(株)日本製鋼所 室蘭製作所
(専門分野/関心分野)原子力発電所向け主要機器材料の製造

□ 目安箱への投書 □

2005 年 10 月

日本原子力学会編集委員会

編集委員会は，読者・会員・投稿者・査読委員等からのご意見，ご提案を頂き，よりよい学会誌・論文誌編集活動を目指すべく，意見窓口「目安箱」を設けております。

- ・学会誌・論文誌の企画，編集，掲載記事・論文に関すること
- ・論文査読方針・審査方針およびシステムに関すること*
- ・新刊図書の書評の推薦

などについてのご意見・ご要望がございましたら，学会ホームページ <http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/publication/meyasu.html> または E-mail (宛先 aesj2005meyasu@aesj.or.jp) にてお寄せ下さい。編集委員会にて検討後，担当編集委員より回答させていただきます。

学会誌，論文誌の編集活動への皆様の積極的なご参加をお願いいたします。

*個々の査読コメント等に関するお問合せ，ご意見等については受け付けかねますのでご了承下さい。