

使用済み燃料貯蔵キャニスタ用広幅厚板 SUS329J4L の耐食性、靱性および溶接性の改良

伊東 眸*・重 隆司*²・(故)毛利 純雄*³・松永 健一*⁴・村上 和夫*⁴
梶村 治彦*⁵・柘植 信二*⁵・松田 隆明*⁶

Improvement of Corrosion Resistance, Toughness and Weldability of SUS329J4L for Large Thick Plate Applied for Canister of Spent Fuel Storage

Hitomi ITOH, Takashi SHIGE, Sumio MOURI, Kenichi MATSUNAGA, Kazuo MURAKAMI, Haruhiko KAJIMURA, Shinji TSUGE and Takaaki MATSUDA

Synopsis : SUS329J4L equivalent to ASTM A240 S31260 is selected for the candidate material of canister for the dry interim storage of spent fuels, for that shows excellent hot workability to manufacture into wide and thick plate and good corrosion resistance for canister usage at the present time. In order to improve the corrosion resistance, toughness and electron beam weldability which is applicable in future, candidate steel is investigated to obtain the suitable chemical compositions within the specification requirements, and the following results are obtained.

(1) Some experimental alloys were melted in the laboratory to obtain the best balance of N and Ni contents for suitable toughness and corrosion resistance, as the contents of Cr and Mo contributed for corrosion resistance are maintained at upper limit of the specification requirements. The best balance is obtained more than 0.2 mass% in N and more than 6.5 mass% in Ni within the specification requirements.

(2) The practical hot rolled plate melted with suitably selected compositions at 3 m in wide and 20 mm in thickness was manufactured with no defects in spite of higher nitrogen contents. The improved plate has satisfactory strength, high toughness and excellent corrosion resistance equivalent to austenitic super stainless steels.

Key words: SUS329J4L; thick plate; duplex stainless steel; corrosion; stress corrosion cracking; electron beam welding; dry storage; canister; pitting potential.

1. 緒言

使用済み燃料は今後貯蔵量が增大するとの見通しから、従来の発電所内での貯蔵に加え、発電所外の施設における貯蔵が計画され¹⁾、経済的に有意な乾式貯蔵容器を採用する方向にある。我が国で検討されている主な乾式貯蔵方式に金属キャスク方式とコンクリートキャスク方式の2つがある²⁾。このうち、コンクリートキャスクは使用済み燃料をいれる金属製の密封容器（直径約1.7m、高さ約5m。以下、キャニスタという）とその外側の放射線の遮蔽容器（コンクリート製）から構成される。キャニスタはコンクリートの筒との間にある空間を通して外部から導入される大気により自然対流で冷却される。キャニスタの概略はFig. 1に示すように厚さ約20mm以下の比較的薄いシェル（外側の胴）、底は約50mm程度の厚板、蓋は2重になっていて遮蔽の役割をする200mm程度の一次蓋と50mm程度の厚板の二次蓋の2枚の蓋で構成され、シェルと2つの蓋

は溶接により密封する構造の設計になっている。Fig. 1よりわかるように蓋の溶接部は通常この種容器に要求される完全溶込み溶接ではなく、構造上片側からの溶接になっている。また発熱している使用済み燃料を入れて密封しているため溶接後の熱処理は構造的に非常にむづかしい。さらに万一落下のような想定事故が発生した場合でも、特に蓋部分では不安定破壊ではなく塑性崩壊が生じるような高靱性が要求される³⁾。

キャニスタは長期にわたって使用済み燃料を貯蔵するものであり、貯蔵初期には外壁温で500K弱程度、貯蔵末期（40～60年後）では部分的に300K程度となる。我が国では貯蔵施設は海岸近くに設置せざるをえず¹⁾、外気から導入される冷却空気には海塩粒子を含むことが不可避であることから、キャニスタ材料は貯蔵後期に海塩粒子が付着した状態で湿潤状態になることが不可避となり、その状態で溶接による引張残留応力が作用する部分には応力腐食割れの発生が懸念されるため、その防止をはかることが必須とな

平成17年12月19日受付 平成18年4月4日受理 (Received on Dec. 19, 2005; Accepted on Apr. 4, 2006)

* 原子力サービスエンジニアリング (Nuclear Plant Service Engineering Co. Ltd., 1-1-1 Wadasaki-cho Hyogo-ku Kobe 652-8585)

* 2 高菱エンジニアリング (Koryo Engineering Co. Ltd.)

* 3 三菱重工業 (株) 高砂研究所 (Takasago R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

* 4 三菱重工業 (株) 神戸造船所 (Kobe Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

* 5 新日鐵住金ステンレス (株) 研究センター (R&D Center, Nippon Steel & Sumikin Stainless Steel Corporation)

* 6 新日鐵住金ステンレス (株) 大阪支店 (Osaka Sales Office, Nippon Steel & Sumikin Stainless Steel Corporation)

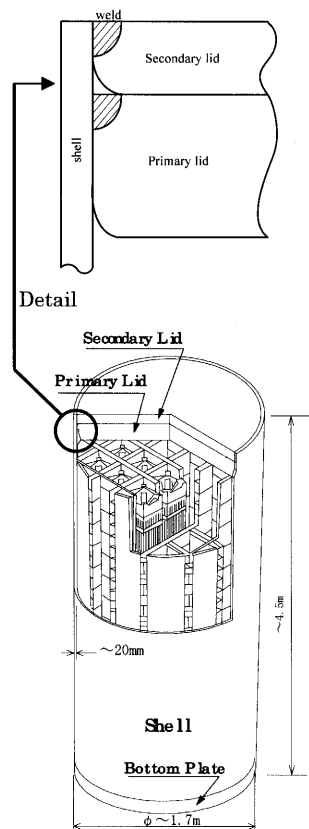


Fig. 1. Representative bird's eye view of canister (Concrete cask).

る。

貯蔵施設を内陸部に設置する海外（米国）ではキャニスタの材料として通常SUS304系のステンレス鋼が使用されている。しかし、我が国のようにキャニスタが海岸近くに設置されるといふ状況から考え、諸外国で通常使用されるSUS304系のオーステナイト系ステンレス鋼では応力腐食割れの発生が不可避となると予想され、さらに耐食性の高い材料を候補材とする必要がある。

キャニスタはそれ自体使用済み燃料の貯蔵を目的としたものであるが、密封後に発電所から貯蔵施設に輸送されることとなっている。このとき密封されたキャニスタは輸送用キャスクに入れられ運搬される。その際、輸送用キャスクとキャニスタ間でクリアランスが保持されることを要求され、このためにキャニスタのシェルは溶接構造とはいえ、外周の円形形状を保持するために特に周方向および縦方向のシームの寸法はかなり厳しい精度を要求される。また、大型構造物であるため、シェル自体の溶接後の後熱処理は炉設備、冷却設備の工場設備の点、熱処理後の変形防止の観点から、施工が極めて困難であることが予想される。このため、変形量を抑えられると期待される電子ビーム溶接の採用も必要に応じて念頭に置く必要がある。さらに、この種容器はコストダウンの要求が厳しく、このためには製造に大きな費用負担となる溶接をできるだけ少なくすることが求められる。すなわち、溶接線長をできるだけ短くす

ることが重要となり、それには広幅の厚板の入手が不可欠となる。シェルを1枚の厚板で製造することは現状のベンダーの圧延設備や熱処理設備の能力から難しく、そのためシェルを2枚で製作できる厚板を調達できることを目標とした。

SUS304系のオーステナイト系ステンレス鋼では耐食性が不足であると考えられることから、データの多い海水用ステンレス鋼の孔食指数を参照として候補材を絞り込んだ。幸ら⁴⁾の孔食指数(Cr+3Mo+10N)を見ると、孔食電位の順は20~30程度のオーステナイト系ステンレス鋼を主体とするもの、30~37程度の2相ステンレス鋼を主体とするもの、最上位にあるのがオーステナイト系のスーパーステンレス鋼を主体とするものとなっている。このSUS304系のオーステナイト系ステンレス鋼を凌駕する耐食性を有する材料として挙げられるのは、2相ステンレス鋼とオーステナイト系スーパーステンレス鋼の2つであるが、上述のように必要となる広幅の厚板は熱間変形抵抗が大きいため必要寸法を満たす板材（幅は少なくとも2.6m、好ましくは3m以上、長さ5m以上、厚み20mmのシェル用の板並びに幅・長さ1.7m、厚さ50mmの蓋材）として実績を有するのは、ごく一部の材料に限られ、調査した範囲ではJIS G 4304 SUS329J4L（ASME SA240 S31260相当材）だけであった。そこで、この材料を候補として、高靱性を保持しながら、長期にわたる安全性を確保するために規格の範囲で耐食性を向上させ、さらに溶接方法として電子ビーム溶接EBWを適用できるように良好な溶接性を有する最適合金成分を検討した。

2. 設計要件を満たすための目標性質

上述したシェル及び蓋をキャニスタ材と以下呼ぶが、このキャニスタ材に要求される目標性質は以下となる。

- ①必要な強度および延性を有すること。具体的には強度および延性がASME SA240 S31260の規格値を満足すること。
 - ②高靱性であること。具体的には、EBWの溶接ままで靱性が確保できること。機械学会規格に準拠して100J以上であること。
 - ③耐食性が高いこと。具体的には幸らの報告⁴⁾にあるように孔食電位がEBW部であっても400mV vs. SCE以上であること。母材は600mV vs. SCE以上であることが望ましい。
 - ④広幅厚板材が製造できること。具体的には幅2.5m以上（望ましくは3m以上）で20mmの厚板ができること。
- 各項目の詳細は以下のとおりである。

強度・延性の①はSUS329J4Lに相当するASME SA240のS31260には設計許容応力値などがそろっているため、これを満足すれば良いと判断した。

②については靱性向上にN量を増加することの利点は想定されてきたが、高合金の場合熱間圧延中に耳割れなどの不具合を起こしやすくなり歩留まりが悪くなると想定されていたので、高N材はこれまで実用されてこなかった。今回の改良に際しては、母材の靱性確保だけでなく溶接部での靱性低下を考慮して母材で273K及び233Kで100J以上のシャルピー靱性値となることを目標とした。また、蓋の溶接はGTAW (TIG)を予定しているが、製造上溶接歪みを極力少なくするために縦シームなどに熱容量の少ない電子ビーム溶接を適用する可能性がある。このときに耐食性に寄与する重要な合金元素であるNが真空中の溶接で低減することが予想されるため、溶接後でも規格要求化学成分を満足することを考慮して検討することにした。

③の耐食性は外気から持ち込まれた海塩粒子が付着し、温度が低下し湿り雰囲気になったとき生じる応力腐食割れを対象にするが、割れ発生に先立って孔食が生じるため、 $PI=Cr+3.3Mo+16N$ ⁵⁾で示される80°C塩水中での孔食電位が急速に向上するPI=39以上を指標とし、規格中の範囲でCrおよびMoは上限値を狙い、相バランスを考慮してオーステナイト安定化元素のNi及びNの添加量を検討した。

また④では高温での加工に変形抵抗の高いNi合金などのオーステナイト単相合金は現状で20mm厚材では幅が2m程度までしか製造できないので対象とできず、2相合金を机上検討で選定した。なお、外気に触れない一次蓋材料は極厚鍛造材となり、本材を必ずしも適用する必要がないため本研究の対象から外した。

3. 予備検討

予備検討としては、通常製造されているS31260相当のSUS329J4Lの成分をノミナル値として比較した。本材料は上述したようにフェライト・オーステナイトが半々になるように合金設計されており、耐食性を向上させるためN量を0.2%以上添加した場合の相バランスを検討した。Thermo Calcを利用して温度・モル比で相の安定性の検討を行った結果をFig. 2に示す。本材の高温側では δ 相が安定しており、温度が低下するに従い γ 相が析出してくる様相を呈している。本材の場合、最終熱処理の焼きなまし温度は約1373K (1100°C)であるため、この温度での相バランスを観ると、ノミナル値の δ/γ は概ね1であるのに対し0.2%以上の高Nであっても、規格値下限(5.5%)に近い低Niであれば6/4とフェライトがかなり多くなる。また、規格値上限(7.5%)に近いと δ/γ は逆に4/6となり γ が優勢になっている。靱性を考慮すれば、 δ/γ が約1近くから γ が多くなる方が有利と推定されるため、Ni量は6.5%以上必要と予想された。

また、Fig. 2からわかるように検討した成分範囲では1100K近傍から下の温度で σ 相が明確に析出している。 σ 相の析出は靱性を損なうことから、この温度領域での徐冷は極力避けることが必要であることが読み取れる。同時に溶接時のパス間温度を低くする必要もある。また、溶接残留応力の低減のための焼鈍でこの温度範囲において徐冷を避ける必要があることも本図は示唆しており、構造体になった後での焼鈍は実質上困難であることを意味して

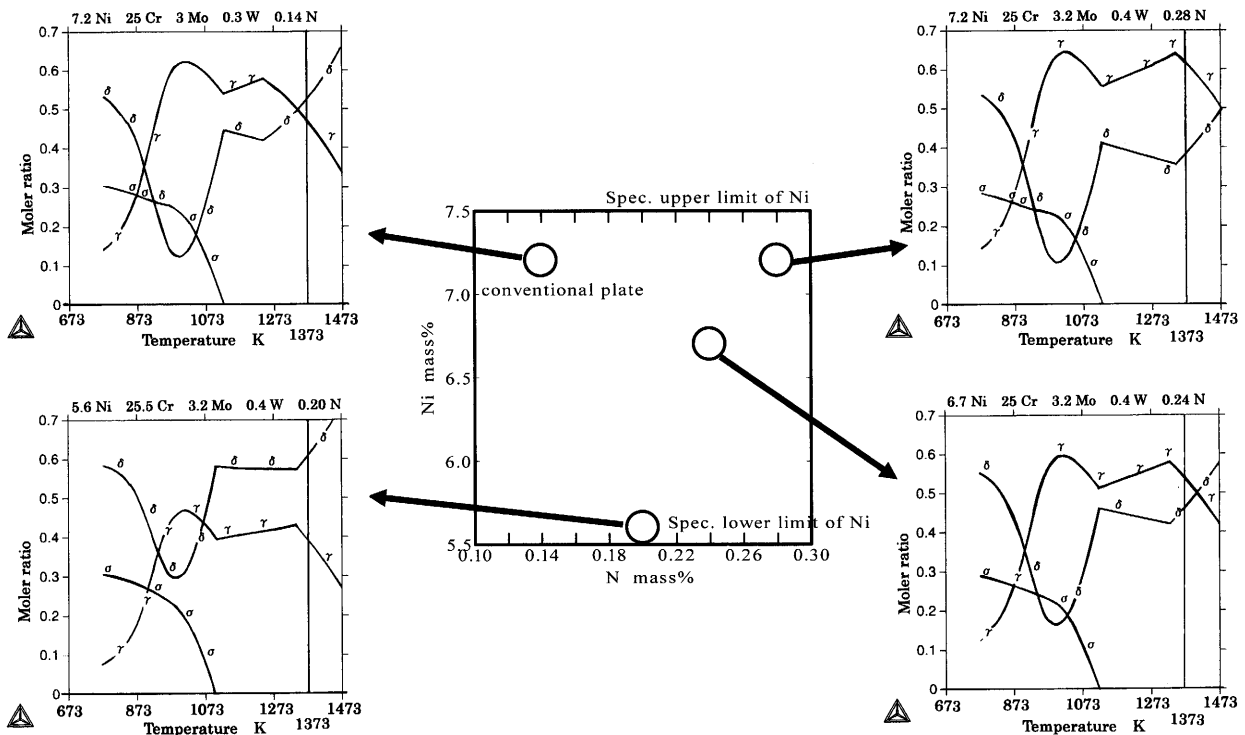


Fig. 2. Preliminary calculation of trial alloys which contain higher N than conventional duplex stainless steels.

Table 1. Chemical compositions of trial alloys.

Lot No.	(mass %)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Cu	N	PI
1	0.020	0.48	0.52	0.021	0.0009	6.75	25.51	3.28	0.43	0.49	0.200	39.5
2	0.021	0.47	0.51	0.021	0.0009	6.69	25.16	3.25	0.42	0.49	0.243	39.8
3	0.020	0.47	0.51	0.021	0.0008	6.65	25.08	3.24	0.42	0.50	0.278	40.2
4	0.020	0.49	0.50	0.013	0.0010	7.13	25.73	3.24	0.39	0.49	0.201	39.6
5	0.020	0.50	0.50	0.016	0.0010	6.38	25.60	3.27	0.40	0.49	0.192	39.5
6	0.020	0.51	0.50	0.012	0.0010	5.44	24.90	3.20	0.40	0.50	0.204	38.7
7	0.020	0.50	0.50	0.013	0.0010	7.09	24.98	3.23	0.40	0.49	0.287	40.2
8	0.019	0.50	0.51	0.013	0.0010	6.00	25.60	3.26	0.39	0.49	0.277	40.8
9	0.027	0.50	0.50	0.016	0.0016	6.70	25.51	3.23	0.40	0.48	0.211	39.5
Conventional	0.014	0.44	0.90	0.026	0.0010	7.23	25.19	3.16	0.28	0.48	0.140	37.9
Spec. S31260	≤0.03	≤0.75	≤1.00	≤0.030	≤0.030	5.50-7.50	24.0-26.0	2.50-3.50	0.10-0.50	0.20-0.80	0.10-0.30	-

$$PI=Cr+3.3Mo+16N$$

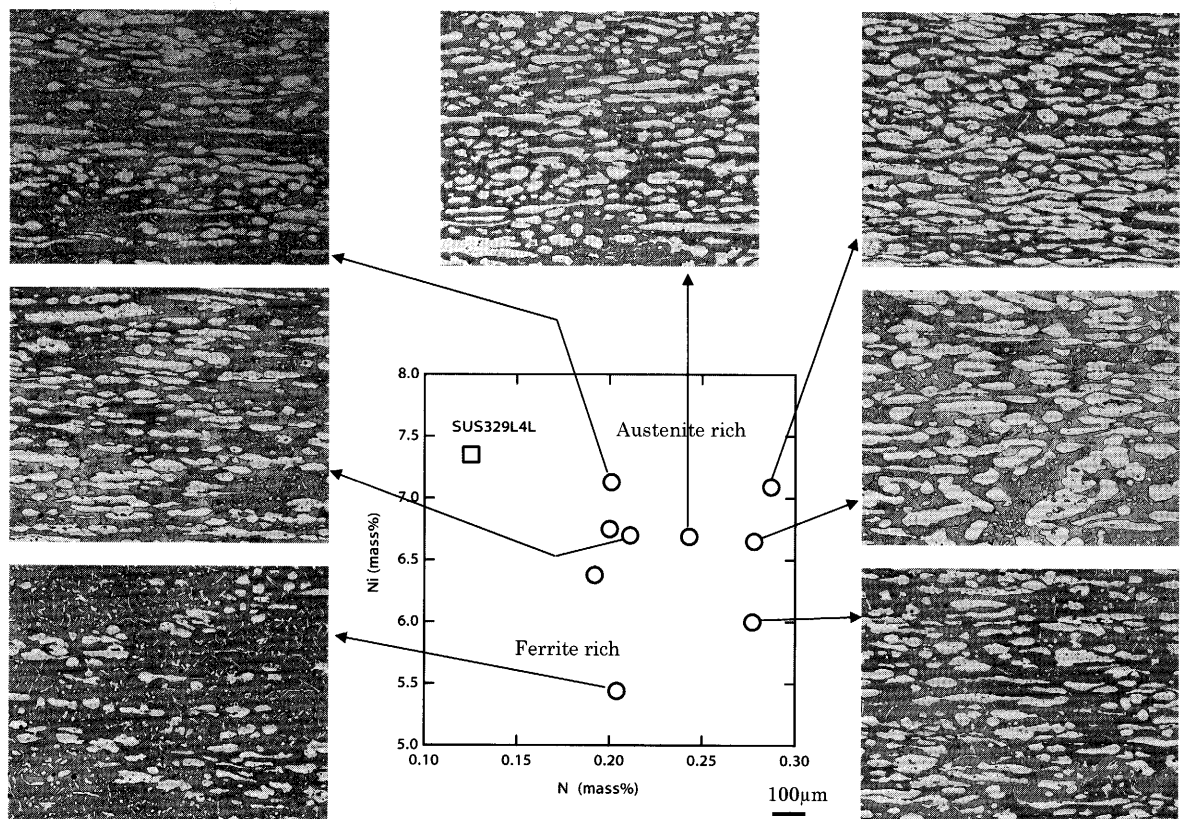


Fig. 3. Representative microstructure of trial alloys.

いる。

4. 小規模溶解材試験結果

4.1 供試材

上述のように耐食性を向上させるために高NにしてNiとN量を変化させた9種の候補材を50kg真空誘導炉(VIM)で溶製し、鍛造・熱間圧延により20mm厚板材にした後、従来材の熱処理を参照して1353Kで焼きなましを施し供試材とした。

4.2 試験結果

(1) 化学成分

供試材の化学成分をTable 1に示す。いずれの供試材もS31260の規格範囲にある。孔食指数PIもフェライト量の

高いLot No. 6が38.7とやや低いことを除けば、残りの8チャージは39以上ある。

(2) 金属組織

いくつかの供試材についてのマイクロ組織をFig. 3に示す。フェライト地に楕円状あるいは微細な棒状のオーステナイトが見られる。予想されたように5.5%程度とNi量の低い供試材(Lot No. 6)のマイクロ組織はオーステナイトの析出が少なく、一方N量が0.24%以上でNi量が6.5%以上ある供試材(Lot No. 2, 3および7)はオーステナイトの析出が多かった。

(3) EBW溶接性

これら20mm板厚の供試材に対してTable 2に示す溶接条件でEBW溶接を実施した。溶接後の代表的なマクロ組織をFig. 4に示すが、溶接ビード形状は良好である。溶接

Table 2. Electron beam welding process.

Beam Current	Accelerating Voltage	Welding Speed	Focal Length	Welding Position Horizontal Position
200 mA	90 kV	500 mm/min	470 mm	

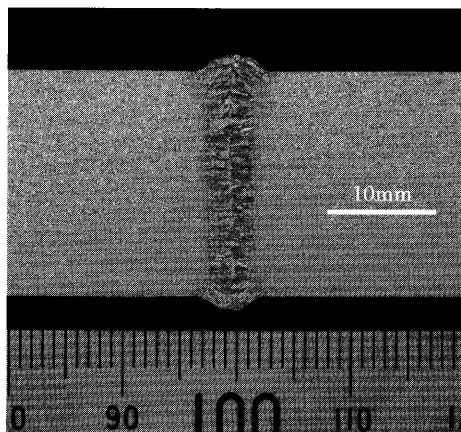


Fig. 4. Representative macrostructure after EBW (Lot. No. 7).

Table 3. RT results of trial alloys.

Lot No.	RT result	Cross sectioned metallographic examination result
1	No defect	0.1mm diameter blowhole
2	No defect	No defect
3	No defect	No defect
4	No defect	—
5	No defect	—
6	No defect	—
7	No defect	No defect
8	No defect	—
9	No defect	No defect
Conventional	No defect	—

後のRT検査結果はTable 3に示すようにいずれも欠陥指示はなく、代表的に観たマイクロ組織観察でも、Lot No. 1に継手性能に影響を及ぼさないような直径0.1 mm程度のごくわずかなブローホール1個が認められただけであり、溶接性は良好と判断された。

(4) 機械的性質

溶接継手、溶接金属を含む機械的性質をTable 4に示す。ASMEの要求値は母材のみに適用されるが、強度・延性ともいずれの供試材とも要求値を満足していた。また溶接継手、溶接金属の強度も母材のそれを凌駕しており、通常の溶接継手の強度性能を有している。

衝撃性質として、273K及び233Kでシャルピー衝撃試験を実施した。母材のそれをFig. 5に示す。図中に示す数字は吸収エネルギーであり、当然ながら273Kの結果より233Kの結果の方が低い値となっている。両試験温度で○印の目標とした100J以上となったのはN量にかかわらず、Niが約6.5%以上含有されている供試材であった。同様にEBW溶接部のシャルピー衝撃試験結果をFig. 6に示す。温度の影響は母材と同様、低温の方が低い韌性値になってい

るが、試験温度にかかわらず衝撃韌性値自体は母材よりもやや高い値となっており、目標値の100J以上となるNiの範囲が広がっていることがわかる。これは結晶粒の大きな板厚のものの方が衝撃性質は高くなる2相ステンレス鋼の結果⁶⁾と一致している。

(5) 耐食性

耐食性の指標としては脱気353K人工海水中での孔食電位で検討した。測定は電位掃引速度0.33 mV/sで行った。母材とEBW溶接金属の両者で測定した結果をFig. 7に示す。図中の数字は孔食電位を示すが、目標とする600 mV vs. SCE以上の領域は概ね母材でNi量が6%以上、N量が0.2%以上の範囲であった。EBW溶接金属の孔食電位は母材と比べ低くなり、検討した範囲内で600 mV vs. SCEを満足する領域はないが、Ni量にかかわらずN量が0.2%以上で400 mV vs. SCE以上となっていた。

(6) 実規模溶解材の目標成分

耐食性の1つである耐隙間腐食性及び広幅の厚板製造性については、次の実規模溶解材で確認することとし、これまでの予備検討結果である溶接部の衝撃特性よりNi \geq 6.5%、また耐食性よるN \geq 0.2%のFig. 8に示す成分範囲とした。なお、30000 kg (30t)の実規模溶解成分目標値も同図に併示した。

5. 実規模溶解材試験結果

前項で示した溶解成分をもつ実規模溶解材を小規模溶解材と同様に分塊・熱間圧延をし、1353Kでの焼きなまし処理をした厚み20 mm、幅3100 mm、長さ5800 mmの板は製造上の困難もなく、正常に製造できた。この実規模溶解材の成分をTable 5に、機械的性質についてはTable 6にそれぞれ示す。いずれの性質も目標とした値を満足していた。

この供試材について耐食性を確認するため、同等規模で製造された耐食材料として用いられている他鋼種と比較しながら孔食電位と隙間腐食性を検討した。

他鋼種と比較した孔食電位の結果をFig. 9に示す。横軸は孔食指数Cr+3.3Mo+16Nで示している。SUS304系のオーステナイトステンレス鋼（孔食指数40未満）や2相ステンレス鋼のSUS329J4Lの孔食指数が400 mV vs. SCEであるのに対して、実規模溶解材の孔食電位は800 mV vs. SCEを示しており、図中A及びBで示すオーステナイト系スーパーステンレス鋼とほぼ同等の耐孔食性を示すことから、成分適正化の効果が確認された。

また、353Kの人工海水中で1ヶ月浸漬した隙間腐食試

Table 4. Mechanical properties of trial alloys.

Lot No.	Base alloy			Weld metal			Weld joint		
	0.2% proof MPa	Tensile MPa	Elongation %	0.2% proof MPa	Tensile MPa	Elongation %	0.2% proof MPa	Tensile MPa	Elongation %
1	571	810	30	711	833	31	674	816	31
2	615	850	30	703	856	33	640	827	33
3	584	860	30	725	876	30	652	832	35
4	589	798	35	734	832	33	652	825	38
5	593	788	31	753	832	31	691	820	35
6	600	781	32	738	814	27	664	805	25
7	581	823	37	741	863	35	631	841	35
8	599	816	36	741	852	35	673	834	31
9	586	790	34	744	854	30	664	808	37
Conventional	577	780	33	747	909	39	674	814	31
Spec. S31260	≥485	≥690	≥20	-	-	-	-	-	-

VIM + Hot Rolled
Annealing: 1353K
Size of materials: 20 mm thickness plates

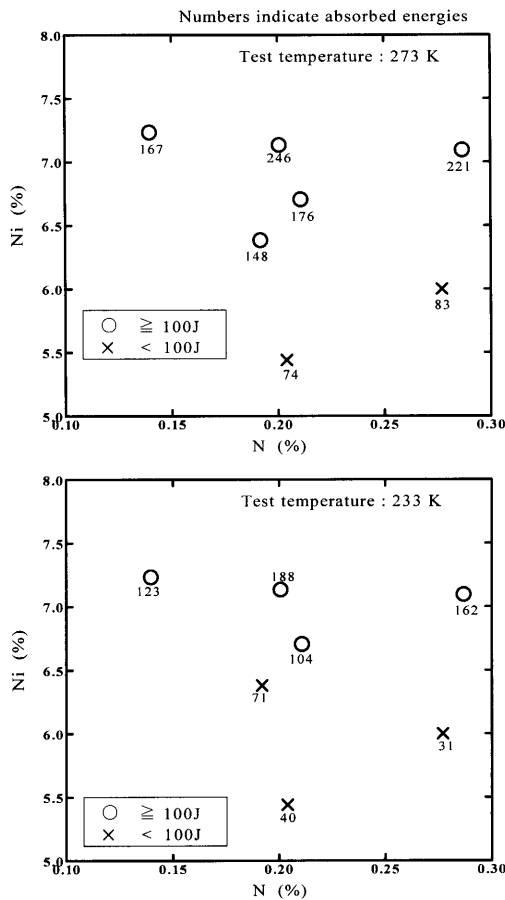


Fig. 5. Charpy impact test result of trial base metals.

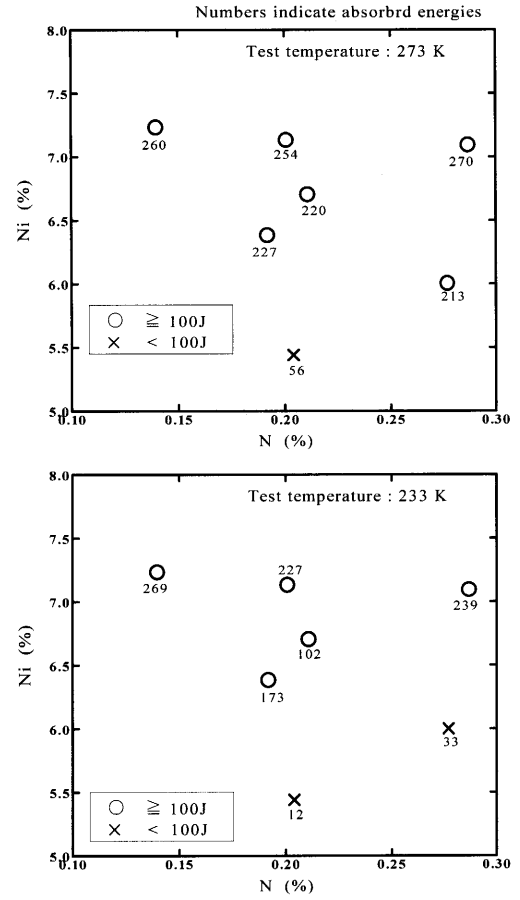


Fig. 6. Charpy impact test result of trial Electron Beam Weld metals.

験の結果を Fig.10 に示すが、通常のオーステナイト系ステンレス鋼の代表である SUS316L や通常材（改良前）の SUS329J4L では隙間腐食が観察されていたのに対し、改良後の本供試材に隙間腐食は認められなかった。

6. 考察

6.1 海塩粒子付着による耐食性の変化

使用済み燃料を貯蔵するキャニスタの表面温度は貯蔵初期には発熱により約 450K 程度になっており、貯蔵期間が長くなるとともに外部から導入される空気により冷却され

ていく。冷却に利用される空気は海岸近くに設置が予定されているため、海塩粒子の堆積は避けられないものと考えられている。貯蔵初期では海塩粒子が堆積しても、外表面は湿り状態とならないため腐食を考慮する必要はないが、冷却が進み外表面温度 350K 程度になって湿度が高くなると結露を生じ、腐食を生じる可能性が高くなる。

今回、S31260 をベースに成分を適正化して耐食性を向上させたが、上述した海塩粒子の付着状況により耐食性がかなり変化すると予想の下、本改良材がどの程度の影響を受けるかを知るために、人工海水の濃度を変えて本改良

材の孔食電位の変化を検討した。結果をFig.11に示す。孔食電位は333Kまでは人工海水濃度によらず、900mV vs. SCE程度にあるが、それ以上の温度になると低下し、人工

海水中の373Kでは約400mV vs. SCEまでになる。さらに人工海水の濃縮が進んで飽和濃度に近い8倍となると353Kで200mV vs. SCEまでになりそれ以上の温度では漸減する。

腐食電位自体は脱気人工海水では全温度範囲で概ね-400mV vs. SCE以下となっているが、実海水におけるステンレス鋼の腐食電位は-0.3~0V vs. SCE⁸⁾との報告がある。また、凝縮水のように水膜が薄くなると酸素供給量が増加し腐食電位は上る傾向にあり⁹⁾、南日本海岸地帯の高温多湿地域の気象¹⁰⁾においても塩化物が吸湿する湿り状態になるのは343K強であることから、軽微な腐食は生じうる可能性はある。

一方、応力腐食割れの起きる要件は、材料因子(耐食性)だけではなく、応力因子及び環境因子が絡んでくる。この内、応力因子としては溶接の残留応力が挙げられるが、通常応力低減として実施される応力除去やきなましはFig. 1

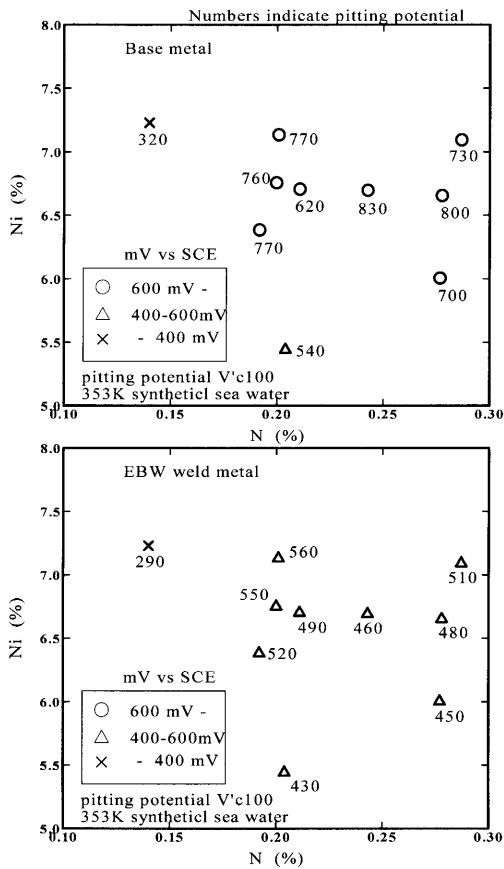


Fig. 7. Pitting potential of trial alloys.

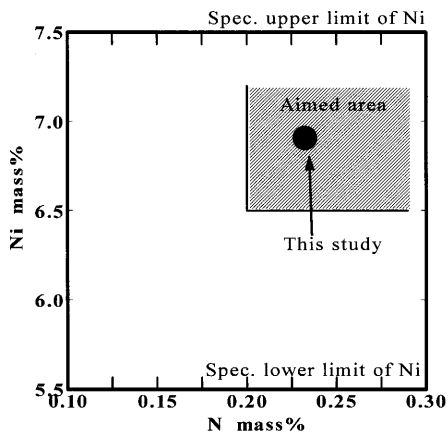


Fig. 8. Aimed Ni-N compositions of industrial scale plate.

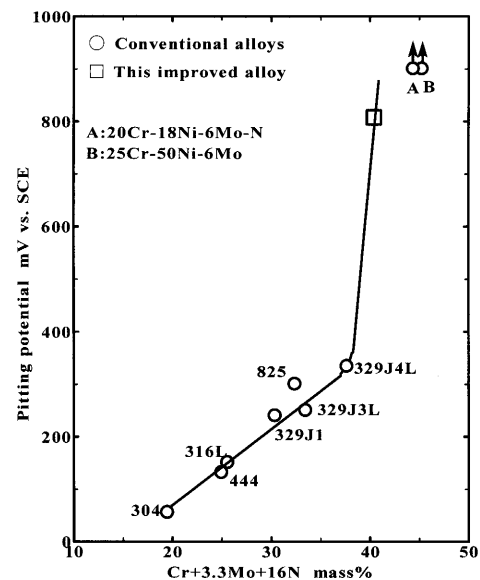


Fig. 9. Pitting potential of industrial scale plate compared with high corrosion resistance alloys.

Table 6. Mechanical properties of industrial scale plate.

0.2% proof strength	617MPa
Tensile strength	837MPa
Elongation	36%
Reduction of Area	73%
Charpy absorbed energy at 273K	241J
Charpy absorbed energy at 233K	150J

Table 5. Chemical compositions of industrial scale plate.

(mass %)					
C	Si	Mn	P	S	Ni
0.01	0.41	0.45	0.024	0.001	6.88
Cr	Mo	W	Cu	N	PI
25.67	3.33	0.40	0.49	0.233	40.3

PI=Cr + 3.3Mo + 16N

Plate size: thickness 20mm
width 3100mm
length 5800mm

Annealing : 1353 K x 1800 s / Water cool

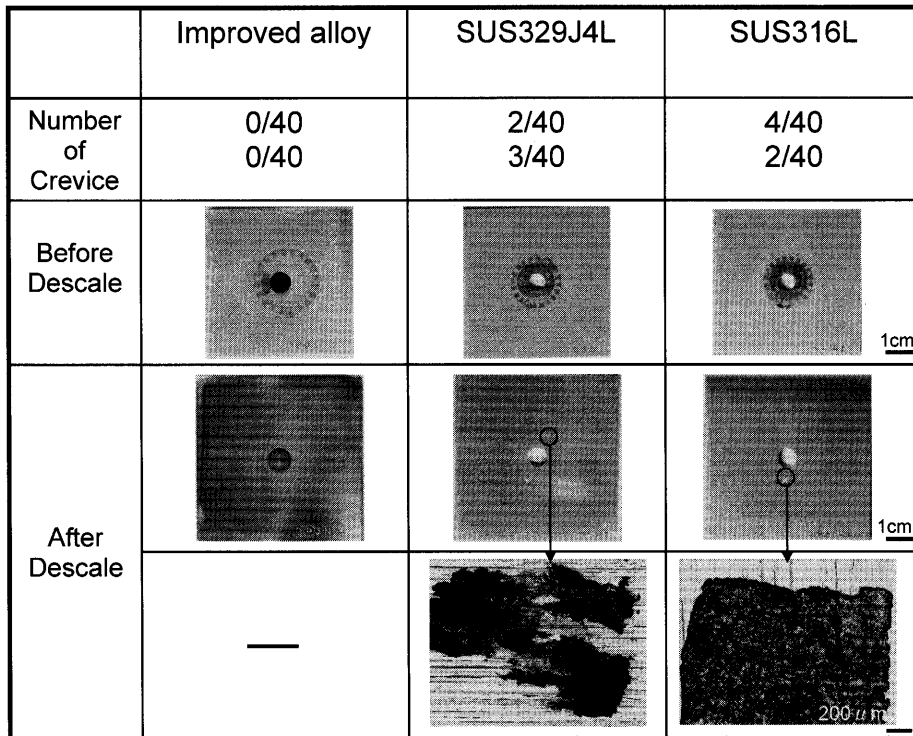


Fig. 10. Multi-creviced corrosion test result in synthetic sea water after 1month at 353K.

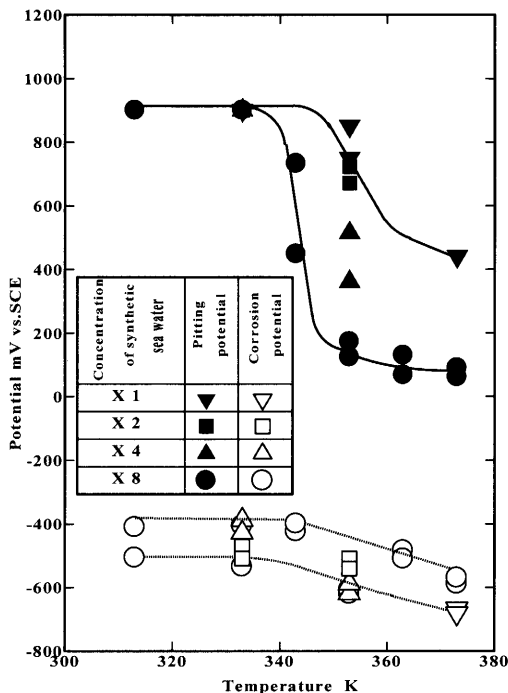


Fig. 11. Effect of temperature on the pitting and corrosion potential of industrial scale plate in the concentrated synthetic sea water.

に示しているとおり、キャニスタ自体は寸法精度を要求される大型の薄肉円筒となるため、施工はきわめて困難になると予想される。しかし、ピーニングなど他の方法での圧縮応力付与による表面改質により、応力腐食割れは解決できると考えられる。

さらに、海塩粒子が乾燥状態で付着すると、常温で湿り

状態で付着する場合とは異なり、腐食への影響が軽くなる¹¹⁾可能性もあろう。また、海塩粒子の付着量を少なくするのも効果があり、そのためには粒子の発生地点からの距離を離すなどの環境対策を材料面だけでなく施す必要があるものと考えられる。

6.2 韌性に及ぼす溶接施工時のパラメータ

予備検討でも温度1100K以下の温度でσ相が析出するため、焼きなまし時や溶接施工時に脆化する可能性を指摘した。そこで、焼きなまし温度の脆化に及ぼす影響を検討した。温度1573Kから1123K、保時時間0.5hで加熱保持後水冷し、引張試験と衝撃試験を実施した。

結果をFig.12に示すが、1300K以上の焼きなまし温度ではフェライト量が多くなるため強度は若干向上し、逆に延性・韌性はわずかに低下する傾向にある。一方、1273K以下では、σ相の析出と考えられる強度の向上、延性の低下、さらに韌性の極端な減少が見られる。

この結果から、応力除去焼きなましをするとしたときには1273K以下の温度では脆化の悪影響が現れることから、その温度以上での施工が必要になる。また、EBWを含む溶接施工でも、1273K以下の温度を徐冷するような作業は極力避けるような処置が必要となる。具体的には予熱、パス間温度、溶接電流、溶接速度などを厳密な管理範囲に抑えることである。

また、今回の改良はN添加によるところが大きいですが、EBWのような真空中での接合では、施工中のガス成分が飛散してしまうことがある。このため、EBWによるN量低減の影響を把握した。その結果をFig.13に示すが、本材

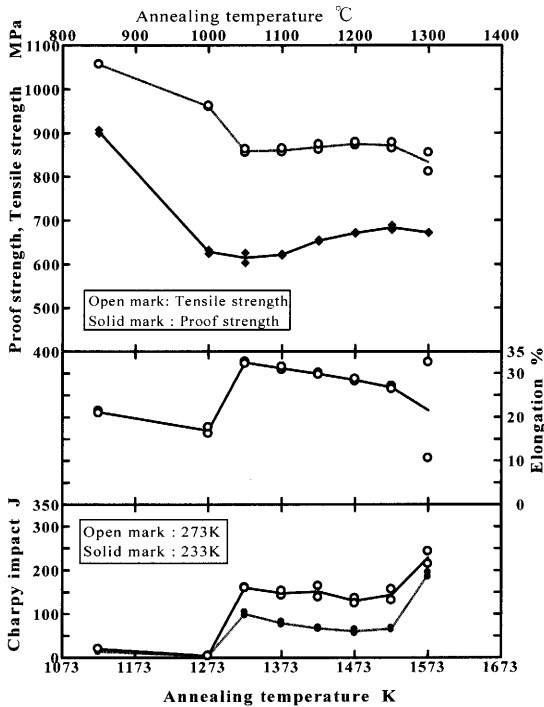


Fig. 12. Mechanical properties after re-annealing.

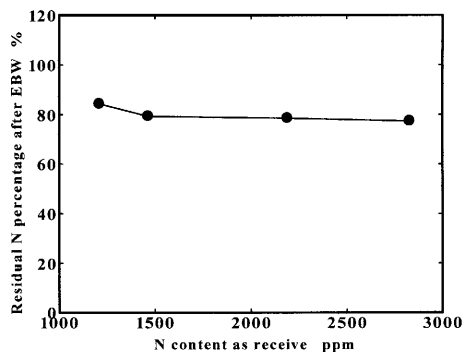


Fig. 13. Residual N contents after EBW.

料の場合1回のEBW施工によるN量の低減はほぼ20%と見積もられ、元のN含有量が少なくなると低減率は下がる傾向にある。なお、この量については、比較することのできる公開文献はないが、この種鋼の溶解作業でのN添加にはガスを用いるのが通常であり¹²⁾、EBW溶接時間に比べ溶解温度での十分に大きな添加時間が必要であるとされていることから本試験で得られたN低減量の結果が妥当であると推定される。

7. まとめ

使用済み燃料を中間貯蔵するためのキャニスタ材とし

て、現時点で幅広の厚板が製造可能であるオーステナイト系ステンレス鋼を凌駕する耐食材としてSUS 329J4Lを選定した。さらに耐食性・韌性を向上させ、将来的に適用される可能性のあるEBW溶接性も考慮した化学成分の適正化を図った。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 耐食性に寄与するCrやMoを規格範囲内で上限を狙い、さらにこれまで熱間加圧延での劣化が懸念され実用化されなかった高いN量と相バランスを考慮したNi量をパラメータとしてシャルピー衝撃韌性及び孔食電位での耐食性評価により成分適正化を実験室的な溶解材により検討した。その結果、N量0.20%以上、Ni量6.5%以上の規格範囲の成分で目標とする強度、延性、韌性及び耐食性が得られた。

(2) 30000 kgの実用規模溶解を行い、幅3 m、板厚20 mmの厚板を製造できることが確認された。改良された候補材の強度は、ASME SA240 S31260の規格を全て満足し、シャルピー衝撃韌性も高く、耐食性もオーステナイト系スーパーステンレス鋼に匹敵することを明らかにした。

Thermo-Calcでの計算に際しては、住友金属工業株式会社総合技術研究所の五十嵐正晃博士のお手をわずらわせました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 原子力白書 (平成16年版), 原子力委員会編, 国立印刷局, 東京, (2005), 42.
- 2) T.Saegusa and K.Shirai: *Energy*, **35** (2002), No. 10, 33.
- 3) IAEA Safety Guide No.TS-G-1.1 (ST-2): Advisory Material for Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA, Vienna, (1999), 250.
- 4) 幸 英昭, 工藤 勉, 矢野 教生, 青木 仁朗, 黒田 稔, 木村 泰二: 第36回腐食防食討論会講演集, C-105, (1989), 283.
- 5) Sandvik 社資料 Sandvik SAF2507.
- 6) H.Itoh, T.Shige, K.Matsunaga, K.Murakami, K.Ohnishi and H.Okunishi: Technology Developments on the Concrete Cask Storage System, ISSF Seminar 2003, KOKUYO-Hall, Tokyo, Japan, May 14-16, (2003).
- 7) T.Tsuruta, T.Kobayashi, G.Abe and K.Matsunaga: Evaluation of the Integrity of Candidate Canister Materials against Chloride Induced SCC in Atmospheric Environments, 13th Asian-pacific Corrosion Control Conference, Osaka University, Japan, Nov. 16-21, (2003).
- 8) 腐食防食ハンドブック, 腐食防食協会編, 丸善, 東京, (2000), 147.
- 9) M.Yamashita, K.Doii and H.Nagano: *Zairyo-to-Kankyo*, **47** (1998), 384.
- 10) 1998 Annual Climate Data in Japan, Japan Meteorological Business Center.
- 11) For example, Salt Information, http://www.siojoho.com/s04/07_01.html, (2005.5).
- 12) ステンレス鋼便覧第3版, ステンレス協会編, 日刊工業新聞社, 東京, (1995), 781.