

技術解説

原子炉用圧力容器用鋼の問題点

山根寿巳*

1. 緒言

石油や石炭などのような化石燃料によるエネルギーは、そう遠くない時代に使いつくされるため、人類は好むと好まざるとにかかわらず、化石燃料以外からのエネルギーによらなければ生活出来なくなる。そのエネルギー源として、まず太陽エネルギーがあげられるが、集エネルギー効率の問題で、大規模エネルギー供給は技術的に困難であると技術者は考え始めている。地熱の利用にしても限度があり、又核融合に至っては、反応時間を維持する問題すら解決されていない現状である。このような状況から、放射能の問題はあるにもせよ核反応による原子力エネルギーを利用せざるをえない。

現在の原子力エネルギーの最大の取り出し方法は、原子力発電であり、実用の原子炉の型式は世界の約87%が炉心を普通の水で冷却する軽水炉であり、この軽水炉には加圧水型（PWR=Pressurized Water Reactor）と沸騰水型（BWR=Boiling Water Reactor）があり、軽水炉のうち約62%はPWRである。ここでは世界の中で数の多い軽水炉の圧力容器用鋼材

の二・三の問題点について述べる。

2. 炉心構造と鋼

原子炉を入れる圧力容器は安全性が重要視され表1に示すような板厚150mm以上の極めて厚い鋼が用いられている。PWR炉心構造と使用鋼材の例を図1に示す。最外側の原子炉容器はフェライト系の低合金鋼が使用される。本来フェライト系の鋼は、中性子の照射を受けると照射脆化をして遷移温度が上昇し、室温以上の温度で脆性を示すようになる性質を示す。この原子炉圧力容器としてオーステナイト系ステンレス鋼を用いれば、他の問題を生ずるにしても遷移温度の上昇の問題はなくなる。しかし、この圧力容器全体をステンレス鋼で作ることは、コストの面であまりにも高価になり過ぎ、クラッド鋼板を用いて、内面における水との接触をステンレス鋼にさせ、水による腐食の防止を計っている。

表2は、現在用いられている原子炉圧力容器用鋼材の化学成分と、機械的性質を示している。この表よりわかるようにアメリカはMn-M₀鋼のA302B鋼が主流を占め、A302B鋼の改良

表1 現在稼働中の主要動力炉用圧力容器

	原子炉名	熱出力 (MW)	電気出力 (net) (MW)	設計圧力 (kg/cm ²)	設計 温度 (°C)	圧力容器				原子炉寿命 (yr)	高速中性 子線量 (n/cm ²)
						内径 (m)	壁厚 (mm)	材質	クラッド		
加圧水形	Shippingport	505	100(+50)	176	316	2.8	213	A 302 B	ロール接合 S.S.	20(80%出力)	6.0 × 10 ¹⁹
	Yankee	540	150	176	343	2.8	200	A 302 B	抵抗溶接 304	20(80%出力)	2.04 × 10 ¹⁹
	Consolidated Edison	585	151(+104)	121	343	3.0	176	A 212 B	抵抗溶接 304	20(80%出力)	7.6 × 10 ¹⁹
	Saxton	20	5	176	343	1.5	127	A 212 B	ロール接合 304	10(50%出力)	9.5 × 10 ¹⁹
沸騰水形	Dresden	700	200	88	327	3.7	137	A 302 B	ロール接合 304	40(全出力)	9.2 × 10 ¹⁹
	Big Rock Point	157	50(75)	120	343	2.7	133	A 302 B	肉盛り 308, 309	40(全出力)	1.24 × 10 ¹⁹
	Humboldt Bay	165	185	88	343	3.0	102~127	A 302 B	ロール接合 304 L	20(100%出力)	1 × 10 ¹⁹
	Pathfinder	189		49	254	3.3	76	A 212 B	ロール接合 S.S.	20	1.4 × 10 ¹⁹
	Elk River	58	22	88	343	2.1	76	A 302 B	肉盛り 304	20(80%出力)	1.9 × 10 ¹⁹
	Bouss	50	16.3	81	316	2.1	86	A 212 B	ロール接合 304	20(100%出力)	9.13 × 10 ¹⁸
	Vallecitos (VBWR)	30		85	300	2.1	86	A 212 B	肉盛り 304	20(65%出力)	5.4 × 10 ¹⁸
	Vallecitos ESADA (EVESR)	12		88	343	2.1	89	A 212 B	肉盛り 304	20(65%出力)	5.6 × 10 ¹⁸
	JPDR	45	12.5	63	343	2.1	67	A 302 B	肉盛り 304	20(200%出力)	6 × 10 ¹⁸

*山根寿巳 (Toshimi YAMANE), 大阪大学, 工学部, 金属材料工学教室, 教授, 工学博士, 金属組織学

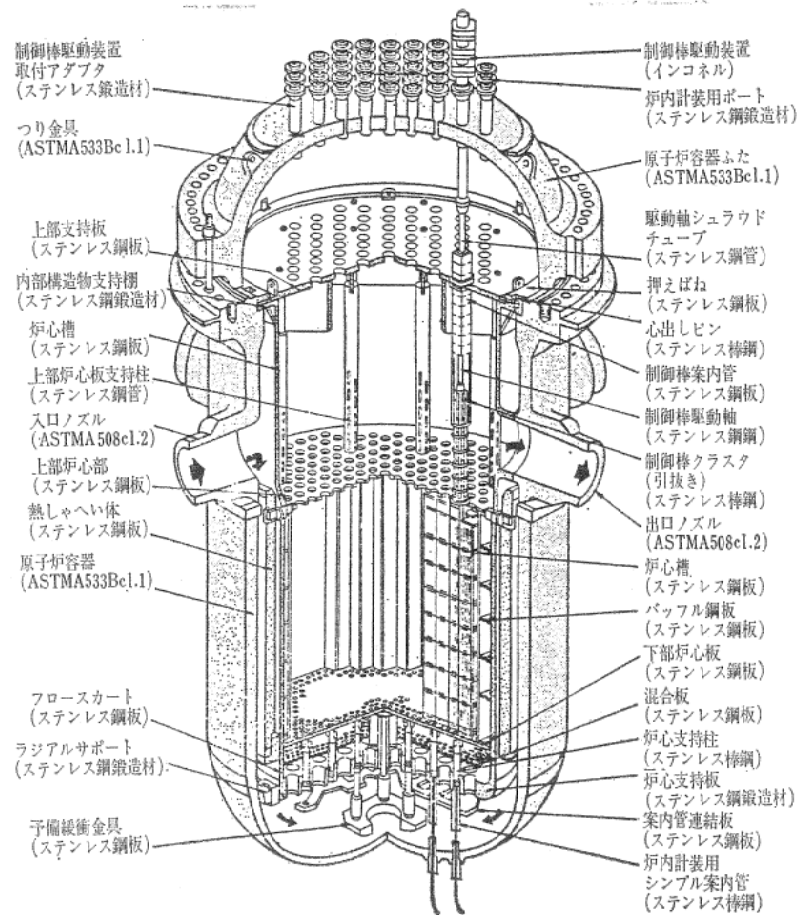


図1 PWR 炉心構造と使用鋼材

表2 現用原子炉圧力容器用鋼材の化学成分と機械的性質

鋼種	化 学 成 分 [%]										機 械 的 性 質			Vノッチ衝撃値 (kgm/cm ²)	備 考	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	引張強さ (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸 び (%)			
ASTM A-201 Grade B (アメリカ)	<0.24 <0.27 <0.30 <0.35	0.15~ 0.30	<0.80	<0.035	<0.04	-	-	-	-	-	42.2~ 50.6	>22.5	>22(8in); >25(2in)	(-12℃): >3.5	≦1in 1in<t≦2in 2in<t≦4in 4in<t≦8in	JIS SB 42C相当
ASTM A-212 Grade B (アメリカ)	<0.31 <0.33 <0.35	0.15~ 0.30	<0.90	<0.035	<0.04	-	-	-	-	-	49.2~ 57.8	>26.7	>18(8in); >21(2in)	(-12℃): >3.5	≦1in 1in<t≦2in 2in<t≦8in	JIS SB 42C 46C相当
ASTM A-302 Grade B (アメリカ)	<0.20 <0.23 <0.25	0.13~ 0.32	1.10 1.55	<0.035	<0.04	<0.80	-	-	0.41~ 0.64	-	56.2~ 70.3	>35.1	>17(2in)	(-12℃): >5.3	≦1in 1in<t≦2in 2in<t≦8in	} 鍛造器
	0.15~ 0.27	0.13~ 0.32	1.20~ 1.55	<0.03	<0.03	0.40~ 0.70	-	-	0.45~ 0.64	-	56.2~ 70.3	>35.1	>17(2in)	(12℃): >5.3		
ASME Code Case 1236(アメリカ)	<0.27	0.15	0.50	<0.04	<0.05	0.50~ 0.90	0.25	-	0.55	-	-	-	-	(-12℃): >5.3	2in<t≦4in	
HY-80 (アメリカ)	<0.22	0.15~ 0.35	0.10~ 0.40	<0.035	<0.040	2.00~ 2.75	0.90~ 1.40	-	0.23~ 0.35	-	>70	56~70	>20(2in)		焼入れ、焼戻し	
T-1(アメリカ)	0.10~ 0.20	0.15~ 0.35	0.60~ 1.00	-	-	0.70~ 1.00	0.40~ 0.80	0.15~ 0.50	0.40~ 0.60	V0.03 B0.003 ~0.006	80~95	>70	>18(2in)		焼入れ、焼戻し	
ロウテム (Loutem) (イギリス)	0.12~ 0.16	-	1.0~ 1.2	<0.045	<0.045	-	-	-	-	0.68 kg/ten	40~46	-	25(2in)	(-10℃): >6.1	CO ₂ (7気圧400℃)に対する 耐食性0.05mm/20yr クリアアブサズ0.18%, 10 ⁵ hr(380℃, 7.8kg/mm ²)で	
Coltuf 28 (イギリス)	<0.10	0.10~ 0.30	<1.10	<0.05	<0.05	-	-	-	-	-	44~50	-	-	(-10℃): >7.7	{板厚10~51mm オーステナイト純度 ASTM 6-8	
Coltuf 32 (イギリス)	<0.12	0.10~ 0.40	<1.16	<0.05	<0.05	-	-	-	-	-	50~60	-	-	(-10℃): >6.0	{板厚 10~51mm 純度 ASTM 6-8	
ASTM A-533 (アメリカ)	<0.25	0.15~ 0.30	1.15~ 1.50	<0.035	<0.040	0.40~ 0.70	-	-	-	-	63.0~ 70.5	>49	>18(2in)			
ASTM A-542 (アメリカ)	<0.15	0.15~ 0.30	0.30~ 0.60	<0.035	<0.035	-	2.00~ 2.50	-	0.90~ 1.10	-	>70.5	>70	>15(2in)		焼入れ、焼戻し	
ASTMA-543 (アメリカ)	<0.23	0.20~ 0.35	<0.4	<0.035	<0.04	3.00~ 4.00	1.50~ 2.00	-	0.45~ 0.60	V 0.037	70.5~ 94.5	>70	>16(2in)		焼入れ、焼戻し	

鋼であるA-533が用いられている。この系の鋼は本来、ボイラー用鋼であり、日本はこの系の鋼を用いている。イギリスは溶接用の低Mn鋼が主流をなしている。近年、高張力鋼の压力容器用鋼としての実用化、試験も行なわれているが、原子炉用压力容器の破損を絶対避けねばならないため厳密な審査を受けなければ簡単に実用に供されない。

3. 中性子照射による遷移温度の上昇

压力容器が原子炉の稼働寿命の20~40年間に受ける高速力中性子量は 10^{19} n/cm²のオーダーであるとされている。鋼が中性子照射により損傷を受けるのは、熱中性子のようにエネルギーの低い(20.03eV)中性子ではなく、1MeV以上の大きなエネルギーを有する高速中性子によってである。

このような高速中性子による鋼の損傷には、(1)鉄の結晶格子原子に高速中性子が衝突しこの格子原子をはじき出す。この格子原子をはじき出すに必要なエネルギーは結晶方位により異なるが20eVオーダーであり、このエネルギーを高速中性子は失うが、次々と格子原子をはじき出し、はじき出しエネルギー以下になるまではじ

き出し、空格子点(原子空孔)をつくって行く。(2)はじき出された原子のエネルギーが熱エネルギーになり、短時間局部的に高温(4000°C位)になり、熱スパイクを生ずる。(3)中性子は、そのもつエネルギーレベルにより異なるが金属原子と核反応をし、核変換した金属の影響が出る。(4)電子構造の変化を生ずる。以上のような損傷のため、鋼の機械的性質に変化が生じる。高速中性子による鋼への影響は中性子照射温度によっても異なるが100°C以下の温度での照射では(1)降伏強さ、引張強さは上昇する。(2)伸び、絞りも低下する。(3)衝撃値は低下し、靱性から脆性への遷移を示すと考えられる遷移温度は著しく上昇する。しかも、この鋼の中性子照射脆化による遷移温度の上昇は、中性子照射量と共に上昇する。表3に中性子照射した鋼の引張性質の変化を示す。

鋼の靱性、脆性を簡単に調べるのにシャルピー衝撃試験が用いられる。図2は、焼きならしと焼入・焼戻し処理をしたA533の150mmの厚板のシャルピー衝撃試験結果を示したものであるが、910°Cより焼きならし(空冷)すると、組織はパーライト状になる。焼入れ焼戻すと炭

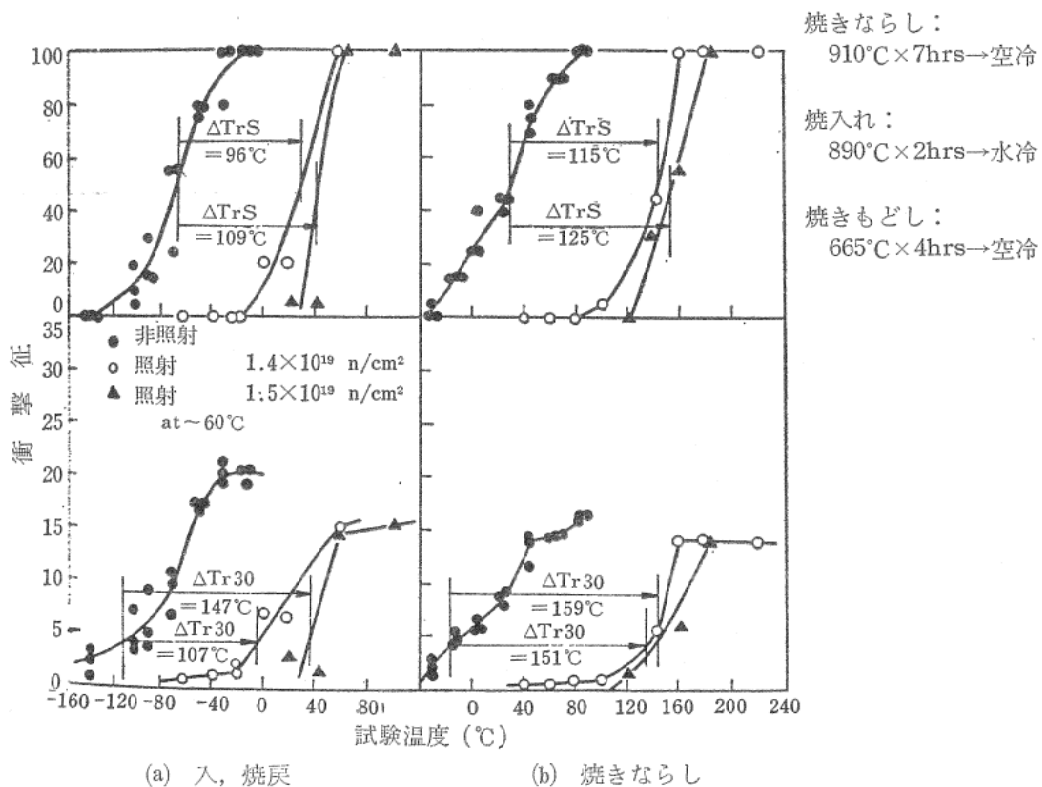


図2 A533鋼の照射ぜい化に及ぼす熱処理の影響

表3 鉄鋼材および他の比較材の機械的性質に及ぼす中性子照射の影響 (照射温度80°C>)

鋼種または主要成分系 〔%〕	中性子 照射量 〔nvt〕	降伏強さ		引張強さ		伸 び	
		σS 〔kg/mm ² 〕	$\Delta\sigma S$ 〔%〕	σB 〔kg/mm ² 〕	$\Delta\sigma B$ 〔%〕	δ 〔%〕	$\Delta\delta$ 〔%〕
0.2C-0.2 Si-0.5Mn 880°C 焼なまし	0	46	—	75	—	22	—
	1.4×10^{18}	70	+52	81	+8	15	-32
	5.0×10^{19}	113	+146	116	+55	4.5	-80
	3.1×10^{20}	111	+141	113	+51	4	-82
ASTM A 302 B 1.4Mn-0.5Mo	0	48	—	61	—	23	—
	2.4×10^{19}	83	+73	83	+36	11	-52
	3.6×10^{19}	85	+77	86	+39	10	-57
ASTM A 203 D 3.5Ni	0	47	—	60	—	25	—
	2.4×10^{19}	84	+79	86	+43	10	-60
	3.6×10^{19}	93	+98	93	+55	9	-64
ASTM A 353 9Ni	0	64	—	83	—	30	—
	1.7×10^{19}	97	+52	104	+25	18	-40
	1.0×10^{20}	128	+100	129	+55	7	-77
HY-65 Ni-Mo-Cu-V	0	67	—	78	—	20	—
	1.8×10^{19}	104	+55	104	+33	10	-50
HY-80 Ni-Cr-Mo	0	72	—	82	—	17	—
	2.5×10^{19}	109	+51	109	+33	9	-47
T-1	0	84	—	91	—	14	—
	1.7×10^{19}	119	+42	120	+32	4.5	-68
AISI 321 18Cr-9Ni-Ti	0	24	—	65	—	66	—
	3.0×10^{17}	37	+54	72	+11	65	-2
Al>99.0, Cu<0.20, Fe+Si<1.0, Mn<0.05 Zn<0.10, 不純物<0.15	0	13	—	14	—	23	—
	2.4×10^{21}	16	+23	19	+36	25.5	-11
	2.6×10^{22}	19	+46	21	+50	23	±0
	0	16	—	26.5	—	34	—
	4.0×10^{19}	26	+62	32	+21	20	-41
	1.0×10^{20}	34	+112	36	+36	15	-56

化物は球状化する。この両者を比較すると炭化物を球状化させて細く分布させる方が靱性がすぐれている。即ち吸収エネルギーが 30ftlb を示す温度を Tr_{30} なる遷移温度とすると照射を $1.4 \times 10^{19} n/cm^2$ すると ΔTr_{30} 107°C と 151°C それぞれ上昇し、衝撃試片の破面が50%延性破面を示す Tr_s なる遷移温度は $1.4 \times 10^{19} n/cm^2$ の照射により 189°C, 129°C の ΔTr_s 上昇を示す。

圧力容器のような大型構造物は必ず溶接する必要がある。如何に母材の鋼板がすぐれていても溶接部にて照射脆化が著しいと意味がなくなる。

溶着金属部と熱影響部と母材の高速中性子照射量を遷移温度の上昇 ΔT_{30} 関係を示すと図3のように溶着金属部と熱影響部の遷移温度上

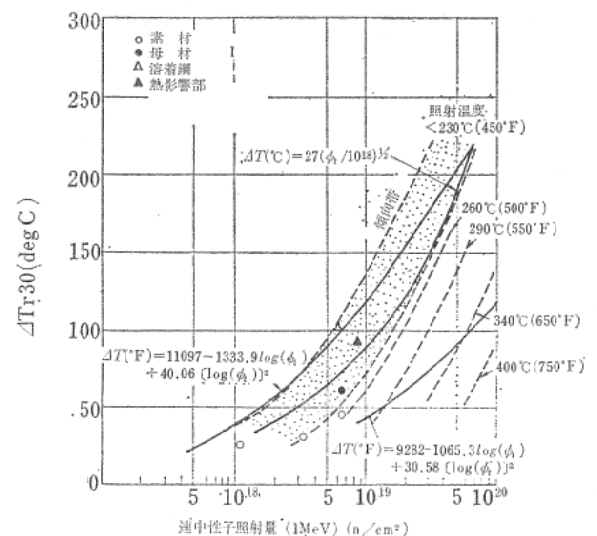


図3 A302B鋼とその溶接部の照射ぜい化傾向

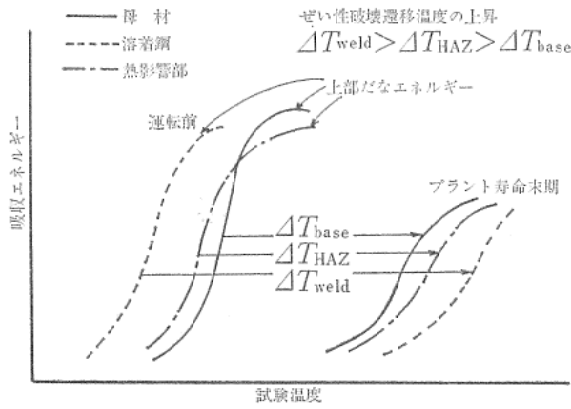


図4 压力容器用鋼の衝撃値の照射による変化

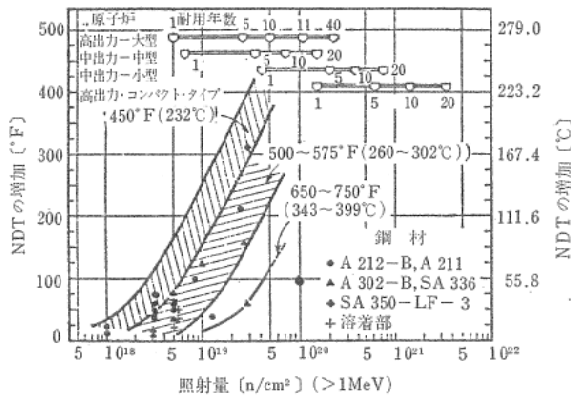


図5 压力容器鋼材の高温照射による NDT 遷移温度上昇

昇は母材の鋼板に比べて著しいものがある。溶接後、歪とり焼きなおしを行なって靱化を計るが、溶接部は組織的に見ると铸件であり、デンドライトのような铸造組織を有しており、母材と同じ靱性をえるには溶加金属によほどの工夫

が必要である。図4は、衝撃試験での照射前後の母材、溶着部と熱影響部の変化を示すもので、原子炉の寿命末期になると、溶接部の脆化が著しくなることを示している。このように遷移温度の上昇のみならず、図中に示す上部だなエネルギーも照射により低下し、鋼の衝撃値の絶対値が低くなるのも一つの大きな問題である。

特に、压力容器の板厚が150mmを越える超厚板になると溶接肉盛の層数が多くなり継手の照射脆化は著しくなる。

压力容器鋼材の高温照射による nilductile temperature (NDT) と中性子照射量の関係を図5に示す。 $10^{19}n/cm^2$ になると100°Cも遷移温度は高温にずれる。理論的には遷移温度が高温にずれれば、原子炉の温度を高くして運転すれば破壊を避けることが出来ることになるが、そのためには炉に接続している熱交換器、蒸気発生器、加圧器など全部に影響するので高温にずらすには限度がある。

4. むすび

以上述べたように原子炉の安全を保障する压力容器には中性子照射による脆化が最も大きな問題であり、脆化しない材質、加工、熱処理の研究は進んでいるが、一方、構造物として用いるためには、溶接構造は避けられないので、150mm以上の厚板の照射脆化しにくい溶接部の研究は更に進める必要がある。