

2

1a	580	28
1b	620	28
2		
3		

-2(Zircaloy-2, Sn 1.20 1.70 %; Fe 0.07 0.20 %; Cr 0.05 1.15 %; Ni 0.03 0.08 %; O 900 1500 ppm Zr)
 -4(Zircaloy-4, Sn 1.20 1.70 %; Fe 0.18 0.24 %; Cr 0.07 1.13 %; Ni 0.07 % ; O 900 1500ppm Zr) 가

가 -2 -4 가

pH / 가 가 / 1

(Niobium, Nb)

가 , 1.0 %

5838753 , 895247 , 910098 , 1111623 11109072
 Nb 0.5 3.25 % Sn 0.3 1.8 %
 (billet) 950 가 (+)
 600 (hollow billet) , 590
 가 (cold-working)
 -Nb
 가

2001061062 Sn Nb 0.60 2 %
 , Sn/Fe 0.25/0.5, 0.4/(0.35-0.5) 0.5/(0.25-0.5) , (Fe+Sn) 0.75 % 가
 , -Nb Zr-Nb-Fe

2001208879 , Nb 0.2 1.5 %
 (Zircaloy) 400 620

2001024193 2001024194
 Fe 0.02 1 % , Nb 0.8 2.3 % , Sn 2000ppm , O 2000ppm , C 100ppm , S 5 35 ppm
 (Cr+V) 0.25 %

11158591
 , - , 가 , 가 , 가
 750 가 500 40 /s
 450 500

06049608 , 가 , 가
 6 가 , 1 가 가 가 700 800 , 가 3×10^{-18} 2×10^{-1}
 400 650

04329855 Zr-2.5 % Nb 870 30 , , 3.9 %
 가 가 500 24 가 가 , (+
) , 1 5 % 가 가

63050453 Nb, Sn Mo (,
 +) , 가 가 가

62182258 Nb 0.2 5 % , Sn 0.5 3 % , Fe 0.1 2 % O 500 2000 ppm
 (+) , , 15 %
 가

% O 1210 ppm Nb 2.5 % , Sn 1.0 % , Fe 0.15
 20 9 mm 940 30 가 , , 40 % 가 , 400
 ppm , Nb 2.5 % O 1230

가

(accumulated annealing parameter, A) 가

(ingot) (1);
 (forging) (2);
 - (3);
 가 (4);
 (initial annealing) (5);
 3 4 가 가 (intermediate vacuum annealing)
 (6);
 (final annealing) (7) 가
 가

(ingot) (1);
 (forging) (2);
 - (3);
 가 (4);
 (initial annealing) (5);
 3 4 가 가 (intermediate vacuum annealing)
 (6);
 (final annealing) (7) 가
 가

(1) Nb 1.1 1.7 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(2) Nb 1.1 1.7 %; Cu 0.01 0.15 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(3) Nb 1.1 1.7 %; Sn 0.3 0.7 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(4) Nb 1.1 1.7 %; Sn 0.3 0.7 %; Fe 0.05 0.4 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(5) Nb 1.1 1.7 %; Sn 0.3 0.7 %; Fe 0.05 0.4 %; Cr 0.05 0.2 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(6) Nb 1.1 1.7 %; Sn 0.3 0.7 %; Fe 0.05 0.4 %; Cu 0.05 0.2 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(ingot) (1);

1000 (forging) (2);

1000 - (3);

600 640 가 (hot-working) (4);

570 610 (initial annealing) (5);

3 4 가 가 570 610 (intermediate vacuum annealing) (6);

470 580 가 가 (final annealing) (7) -

1 Zr Nb, Sn, Fe, Cr, Cu, O Si (ingot melting)

2 1000 (forging) 1100 1200

3 - 1000 (martensite) (widmanstatten) (-q) 400

1050 1100 300 /s

4 - (hollow billet) 가 (hot extrusion) 가 (cold-working) (extruded bar) 600 640

5 570 610 580 3

6 가 4 가 9.5 mm, 0.57 mm -Nb Nb 570 610 30 100 3 10 Nb 가 3 가 580 3 10

7 가 470 580 3 Nb 가 가 가 가 (accumulated annealing parameter)

ter, A)가 1×10^{-18} 가

가 80 nm 가

$$\sum A = \sum t_i \exp(-Q/Rt_i)$$

(,

t_i - i ,

T_i - i ,

Q ,

Q/R 4000K .)

(1) Nb 1.1 1.7 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(2) Nb 1.1 1.7 %; Cu 0.01 0.15 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(3) Nb 1.1 1.7 %; Sn 0.3 0.7 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(4) Nb 1.1 1.7 %; Sn 0.3 0.7 %; Fe 0.05 0.4 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(5) Nb 1.1 1.7 %; Sn 0.3 0.7 %; Fe 0.05 0.4 %; Cr 0.05 0.2 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(6) Nb 1.1 1.7 %; Sn 0.3 0.7 %; Fe 0.05 0.4 %; Cu 0.05 0.2 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(1) Nb 1.5 %; O 1200 ppm; Si 100 ppm Zr

(2) Nb 1.2 %; Cu 0.1 %; O 1200 ppm; Si 100 ppm Zr

(3) Nb 1.5 %; Sn 0.4 %; O 1200 ppm; Si 100 ppm Zr

(4) Nb 1.5 %; Sn 0.4 %; Fe 0.2 %; O 1200 ppm; Si 100 ppm Zr

(5) Nb 1.5 %; Sn 0.4 %; Fe 0.2 %; Cr 0.1 %; O 1200 ppm; Si 100 ppm Zr

(6) Nb 1.5 %; Sn 0.4 %; Fe 0.1 %; Cu 0.1 %; O 1200 ppm; Si 100 ppm Zr

< 1 >

1

1 , Zr Nb, Sn, Fe, Cr, Cu, O Si

1100

1050

300 /s

(martensite)

400

(widmanstatten)

가

630

가

580

3

4
가

가

9.5 mm,

0.57 mm

가

Nb

580

620

가

10

30

가

3

가

Nb

580

5

10

가

470 580

3

[1]

	Nb (%)	Sn (%)	Fe (%)	Cr (%)	Cu (%)	O (ppm)	Si (ppm)	Zr
1	1.12	-	-	-	-	1200	110	
2	1.25	-	-	-	-	1400	100	
3	1.32	-	-	-	-	1300	100	
4	1.51	-	-	-	-	1400	90	
5	1.68	-	-	-	-	1200	100	
6	1.35	-	-	-	0.02	1500	90	
7	1.49	-	-	-	0.14	1400	110	
8	1.52	-	-	-	0.11	1400	110	
9	1.59	-	-	-	0.12	1200	100	
10	1.62	-	-	-	0.09	1200	110	
11	1.39	0.45	-	-	-	800	110	
12	1.42	0.25	-	-	-	1000	100	
13	1.51	0.41	-	-	-	1000	110	
14	1.57	0.52	-	-	-	1400	90	

15	1.66	0.62	-	-	-	1300	120	
16	1.15	0.37	0.05	-	-	900	120	
17	1.29	0.32	0.11	-	-	1200	90	
18	1.50	0.43	0.12	-	-	1000	110	
19	1.57	0.49	0.23	-	-	1100	110	
20	1.62	0.61	0.35	-	-	1100	100	
21	1.11	0.31	0.09	0.06	-	1000	100	
22	1.28	0.40	0.12	0.10	-	900	80	
23	1.51	0.49	0.22	0.12	-	800	90	
24	1.59	0.59	0.29	0.14	-	1000	110	
25	1.62	0.32	0.37	0.16	-	1100	100	
26	1.14	0.33	0.06	-	0.05	1500	120	
27	1.30	0.32	0.21	-	0.11	1300	110	
28	1.55	0.40	0.23	-	0.10	1100	90	
29	1.61	0.57	0.29	-	0.09	1100	90	
30	1.69	0.61	0.33	-	0.15	1200	120	

< 1 >

(18.9 MPa), 400 (autoclave) 150 (10.3 MPa) 360 가 70 ppm LiOH 가 , 360 (18.9 MPa) 620 2 520 -4 4 가 가 580

[2]

	150 가 (mg/dm ²)					
	360		400		360 LiOH	
	580	620	580	620	580	620
1	48	55	99	106	49	57
2	45	53	102	110	48	55
3	48	55	101	108	48	56
4	49	57	105	112	45	52
5	49	56	104	112	49	57
6	51	58	95	102	45	53
7	46	44	101	109	49	56
8	45	52	97	104	52	60
9	49	57	103	111	51	58
10	49	58	102	109	47	55
11	59	60	102	110	55	63
12	51	59	97	105	51	58
13	52	59	96	103	53	61
14	49	56	96	104	50	57

15	50	58	98	106	51	58
16	46	53	101	108	48	56
17	53	61	99	107	54	61
18	45	52	98	106	45	53
19	48	56	104	111	49	56
20	52	59	106	103	51	58
21	47	54	97	104	49	57
22	49	57	95	103	52	59
23	46	53	95	102	47	55
24	47	55	101	109	49	57
25	54	61	98	106	55	62
26	46	53	93	110	46	54
27	49	57	93	111	48	55
28	45	52	91	98	49	57
29	46	54	91	99	51	59
30	46	53	94	111	49	57
-4	58		114		65	

2 가 , 가 , -4 580
620

, 3 가 580 10 2
4 가 가 580 30

< 2 >

가 가 3, 8, 13, 18, 23 28 4
(TEM, transmission electron microscope)

1 13, 28, 18, 23 28 , 3 3, 8,

1 , 1a 580 , 1b 620

[3]

	580		620	
		(nm)		(nm)
3	-Nb Zr ₂ Fe	50	-Zr Zr ₂ Fe	100

	Zr ₃ Fe		Zr ₃ Fe	
8	-Nb Zr(Fe,Cu) ₂	70	-Zr Zr(Fe,Cu) ₂	120
13	-Nb Zr ₂ Fe Zr ₃ Fe	62	-Zr Zr ₂ Fe Zr ₃ Fe	104
18	-Nb Zr ₂ Fe Zr ₃ Fe	72	-Zr Zr ₂ Fe Zr ₃ Fe	121
23	-Nb Zr(Fe,Cr) ₂	79	-Zr Zr(Fe,Cr) ₂	149
28	-Nb Zr(Fe,Cu) ₂	77	-Zr Zr(Fe,Cu) ₂	136

20, 3, 580, -Zr, 6, 580, 100, 140 nm, 80 nm, -Nb, 50, 80 nm, 620, 580, 80 nm, Nb, Zr, Nb

2, 28, Nb, 580, Nb, -Nb, Nb, Nb, 620, Nb, Nb, 580, Nb, 가

3, Nb, Nb, 가 0.3 0.6 %, 360, 가 150, 580, Nb

가 가

(57)

1.

Nb 1.1 1.7 %; O 600 1600 ppm; Si 80 120 ppm Zr

(ingot) (1);

1000 (forging) (2);

1000 - (3);
 600 640 가 (hot-working) (4);
 570 610 (initial annealing) (5);
 3 4 가 가 570 610 (intermediate vacuum annealing) (6);
 470 580 (final annealing) (7) -

2.
 1 , 0.3 0.6 % 580 가 -
3.
 1 , 가 6 가 가 4 가 , 580 30 100
4.
 1 가 , 가 6 가 가 3 가 가 가 580
 3 10
5.
 1 , 가 80 nm 가 1×10^{-18} 가 , -Nb

6.
 Nb 1.1 1.7 %, Cu 0.01 0.15 %, O 600 1600 ppm, Si 80 120 ppm Zr

(ingot) (1);
 1000 (forging) (2);
 1000 - (3);
 600 640 가 (hot-working) (4);
 570 610 (initial annealing) (5);
 3 4 가 가 570 610 (intermediate vacuum annealing) (6);
 470 580 (final annealing) (7) -

7.
 6 , 0.3 0.6 % 580 가 -
8.
 6 , 6 가 가 4 , 580 30 100

가 가 가

9.

6 가 3 10 , 가 6 가 3 가 가 가 580

10.

6 , 가 80 nm 가 1×10^{-18} 가 , -Nb

11.

Nb 1.1 1.7 %, Sn 0.3 0.7 %, O 600 1600 ppm, Si 80 120 ppm Zr

(ingot) (1);

1000 (forging) (2);

1000 - (3);

600 640 가 (hot-working) (4);

570 610 (initial annealing) (5);

3 4 가 가 570 610 (intermediate vacuum annealing) (6);

470 580 (final annealing) (7) -

12.

11 , 0.3 0.6 % 580 가 -

13.

11 , 가 6 가 가 4 , 580 30 100

14.

11 가 3 10 , 가 6 가 3 가 가 가 580

15.

11 , 가 80 nm 가 1×10^{-18} 가 , -Nb

16.

Nb 1.1 1.7 %, Sn 0.3 0.7 %, Fe 0.05 0.4 %, O 600 1600 ppm, Si 80 120 ppm Zr

(ingot) (1);

1000 (forging) (2);

1000 - (3);
 600 640 가 (hot-working) (4);
 570 610 (initial annealing) (5);
 3 4 가 가 570 610 (intermediate vacuum annealing) (6);
 470 580 (final annealing) (7) -

17.
 16 , 0.3 0.6 % 580 가 -

18.
 16 , 가 6 가 가 4 가 , 580 30 100

19.
 16 가 , 가 6 가 3 가 가 가 580
 3 10

20.
 16 , 가 80 nm 가 1×10^{-18} 가 , -Nb

21.
 Nb 1.1 1.7 %, Sn 0.3 0.7 %, Fe 0.05 0.4 %, Cr 0.05 0.2 %, O 600 1600 ppm, Si 80 1 20 ppm Zr
 (ingot) (1);

1000 (forging) (2);

1000 - (3);
 600 640 가 (hot-working) (4);
 570 610 (initial annealing) (5);
 3 4 가 가 570 610 (intermediate vacuum annealing) (6);
 470 580 (final annealing) (7) -

22.
 21 , 0.3 0.6 % 580 가 -

23.
 21 , 6 가 4 , 580 30 100

가 가 가 .

24.

21 , 6 가 3 가 가 580
 가 가 가
 3 10 .

25.

21 , 1 × 10⁻¹⁸ 가 , -Nb
 가 80 nm 가 .

26.

Nb 1.1 1.7 , Sn 0.3 0.7 % , Fe 0.05 0.4 % , Cu 0.05 0.2 % , O 600 1600 ppm, Si 80 1
 20 ppm Zr ,
 (ingot) (1);
 1000 (forging) (2);
 1000 - (3);
 600 640 가 (hot-working) (4);
 570 610 (initial annealing) (5);
 3 4 가 가 570 610 (intermediate vacuum anne
 aling) (6);
 470 580 (final annealing) (7) -

27.

26 , 580 -
 0.3 0.6 % 가 .

28.

26 , 6 가 4 , 580 30 100
 가 가 가 가 .

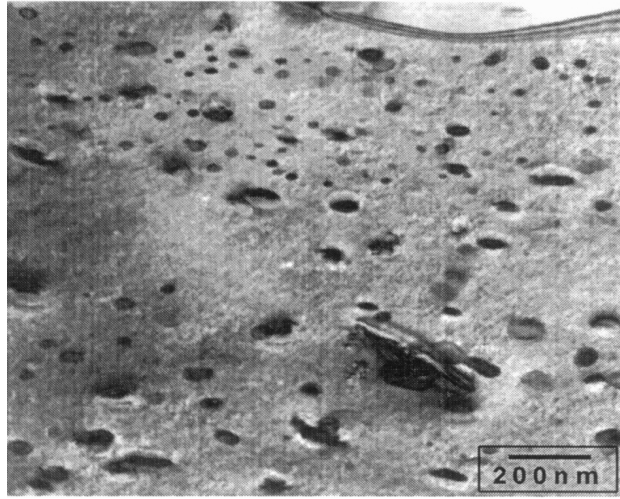
29.

26 , 6 가 3 가 가 580
 가 가 가 가
 3 10 .

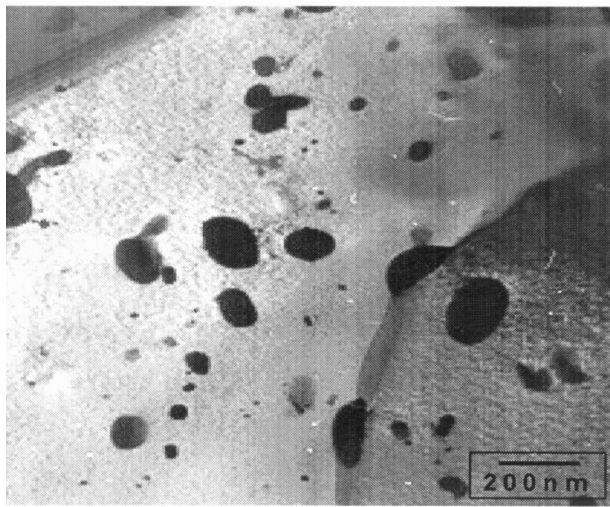
30.

26 , 1 × 10⁻¹⁸ 가 , -Nb
 가 80 nm 가 .

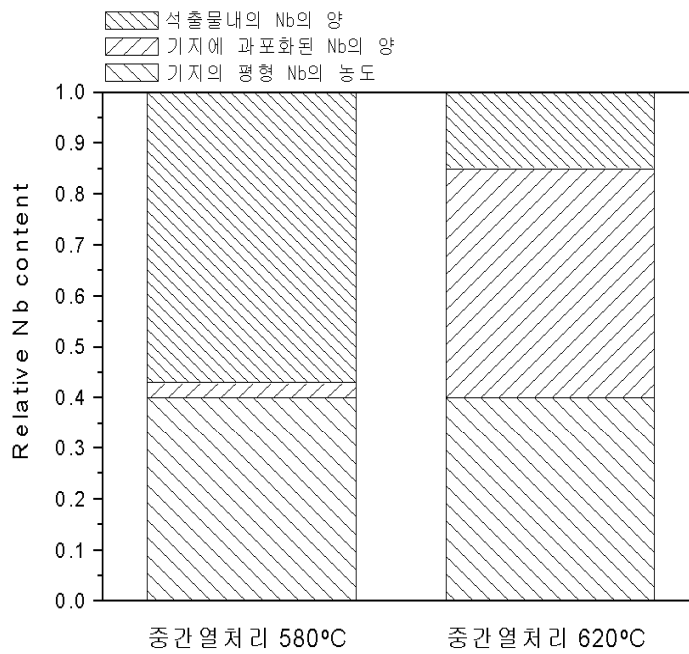
1a



1b



2



3

