22. 原子炉用ジルコニウム合金の 溶解加工法とその諸性質

高尾善一郎*, 西原 守*, 八木芳郎*, 宮本一雄*

On the Processing Method and Properties of Zircaloy-2 and -3

By Z. TAKAO, M. NISHIHARA, Y. YAGI and K. MIYAMOTO

Zircaloy-2 and -3 are now most widely used for cladding material of fuel elements as well as for structural material for various types of reactors. Therefore, study has been made to establish the melting and fabrication technique of these alloys in this country and their properties have also been examined. Using a newly designed and constructed vacuum arc melting furnace for the melting of zirconium alloys, ingots of Zircaloy-2 and -3 have been successfully produced by consumable electrode double arc melting method and sheets, bars, pipes and wires have been fabricated through hot and cold working such as forging, rolling, extrusion and drawing.

On the other hand, method of spectrochemical analysis of alloying elements and hafnium in those alloys has also been developed. Beside this, various properties of the zirconium products; such as tensile properties, creep rupture properties, corrosion properties and so on have been studied. It is proved from these tests that the properties of thus made zirconium alloys is quite satisfactorily compared with that of foreign made alloys, which has given fundamental informations to produce zirconium alloys for reactor applications in an industrial scale in this country.

緒 言

原子炉用としてのジルコニウム合金は、その核特性、耐食性および高温特性が優れているため、各種原子炉にますます広範囲に使用されるようになってきており、各種形式の合金が盛んに研究されている。それらの中でジルカローイ-2は Shippingport の PWR, Dresden の BWR をはじめ水性均質型原子炉 HRT あるいは潜水艦用加圧水型原子炉などの炉心部構造材に相当多量に使用されており、現在もっとも広く利用され、その性能も優れている。そのため、わが国における原子炉用金属材料開発においても、まずジルカローイ-2およびそれに類似のジルカローイ-3を取り上げるべきであるとの観点から、筆者らは昭和32年度に科学技術庁原子力局より原子力平和利用研究費補助金の交付を受け、ジルカローイ-2, ジルカローイ-3の溶解加工に関する研究を実施した。原子炉用ジルコニウム合金は一般の金属に比し、きわめて厳格な規定を満足しなければならないため、当初かなりの困難が予想されたが、従来、筆者らがチタンなどの溶解用に開発してきた真空アーク溶解炉を基礎として、これに種々の改良を加えた溶解設備を新設し、偏析のない健全な鋳塊を製造

することができた。ついで熱間、冷間の加工条件を検討し、板、棒、線、管を試作した。この間ジルコニウム中の微量元素の分析法を確立するとともに各種製品について抗張性質、クリープ性質などの機械的性質、熱処理性質、耐食性質その他につき確性試験を実施し、それらが外国で発表されているデータに比して遜色のないことを確かめた。かくして、原子炉用としてのジルコニウム合金を工業的に生産しうる基礎がえられた次第であるが、以下にその研究の概要を報告し関係各位のご参考に供したい。

1. ジルカローイ-2, ジルカローイ-3の 溶解法および加工法

1. 溶解法

スポンジ・ジルコニウムおよび添加合金元素をダイス中にプレスし、80 mmφのブリケットとしてこれを不活性ガスチャンバー溶接機で溶接し、約1,500 mm長の消耗電極とした。この消耗電極を前述の真空アーク溶解炉にて溶解し130 mmφの鋳塊とした。次いでこの一次溶解鋳塊を再溶解し180 mmφ約50 kgの鋳塊

* 神戸製鋼所 神戸研究部 (Kobe Steel Works, Ltd., Kobe Research & Laboratory Section)

とした。溶製した鋳塊は超音波探傷機で内部欠陥のないことを確かめ、また鋳塊各部より分析試料を採取して添加合金元素の偏析試験を行なった。その結果は第2表に示すとおりジルカローイ-2、ジルカローイ-3のいずれもほとんど偏析がなく、満足すべきものであった。なお第1表に使用した原子炉純度スポンジ・ジルコニウムおよび比較材として同様に溶製した工業用純ジルコニウム鋳塊の化学組成を示した。写真1にこれらの鋳塊を示す。

第1表 使用した原子炉用ジルコニウム・スポンジの化学成分(東洋ジルコニウム報告)(ppm)

	規格 (max)	代表値	分析値	規格 (max)	代表値	分析値
Al	75	50	59	Mn	50	30
B	0.5	0.3	0.5	Mo	50	10
Cd	0.5	0.3		Na	50	—
C	500	250		Ni	70	<30
Cl	1,300	500	40	N	50	<22
Cr	200	20	92	O	1,400	1,100
Co	20	10	<5	Si	100	70
Cu	50	25		Sn	—	10
Hf	200	125	79	Ti	50	<30
Fe	1,500	1,300	474	W	50	20
Pb	130	30	<30	V		<20
Mg	600	200				

第2表(1) ジルカローイ鋳塊の化学成分
(板用鋳塊)

溶解番号および採取位置	化 学 成 分 (%)						
	Sn	Fe	Cr	Ni	Hf	N ₂	B, H, N
Zircaloy-2 13AS-44	1.63	.150	.119	.046		.0021	
	1.54	.137	.109	.041		.0024	
	1.54	.138	.110	.042		.0024	
	1.51	.137	.113	.039		.0021	
平 均	1.55	.141	.112	.042	ppm 107	.0022	150
範 囲	1.51 ~1.63	.137 ~.150	.110 ~.119	.039 ~.046		0.0021 ~0.0024	146~153
規 格	1.3 ~1.6	0.07 ~0.20	0.05 ~0.16	0.03 ~0.08			
Zircaloy-3 13AS-42	.48	.343	<0.02	<0.02		.0018	
	.49	.337	"	"		.0018	
	.45	.330	"	"		.0021	
	.48	.365	"	"		.0018	
平 均	.47	.343	<0.02	<0.02	ppm 104	.0019	133
範 囲	.47 ~.49	.330 ~.365	<0.02	<0.02		0.0018 ~0.0021	128~139

(棒線管用鋳塊)

溶解番号および採取位置	化 学 成 分 (%)						
	Sn	Fe	Cr	Ni	Hf	N ₂	B, H, N
Zircaloy-2 13AS-45	1.60	.137	.113	.040		.0024	
	1.60	.137	.114	.041		.0021	
	1.60	.130	.108	.039		.0021	
	1.41	.120	.100	.038		.0016	
平 均	1.55	.130	.109	.039	ppm 108	.0021	151
範 囲	1.41 ~1.60	.120 ~.137	.100 ~.114	.038 ~.041		0.0016 ~0.0024	146~155
規 格	1.3 ~1.6	0.07 ~0.20	0.05 ~0.16	0.03 ~0.08			
Zircaloy-3 13AS-43	.48	.343	<0.02	<0.02		.0018	
	.49	.337	"	"		.0018	
	.45	.330	"	"		.0021	
	.48	.365	"	"		.0018	
平 均	.47	.343	<0.02	<0.02	ppm 104	.0019	133
範 囲	.45 ~.49	.330 ~.365	<0.02	<0.02		0.0018 ~0.0021	128~137

第2表(2) 工業用ジルコニウム鋳塊の化学成分

Al	Mn	Ti	Mg	Hf	Fe	O	N	H
0.052	0.0072	0.01	0.014	0.0050	0.041	0.15	0.0215	0.0046

写真1 ジルカローイ鋳塊

2. 加工法

溶製したジルカローイ鋳塊をスラブおよびビレットに鍛造し、さらに熱間圧延、冷間圧延、熱間押出および冷間抽伸によって写真2に示すとき板、棒、線および管

写真2 ジルカローイ加工製品

を試作した。おのおのの加工工程を第3表に示す。

おのおのの加工条件を示すと、

鍛造 鋳塊を 850℃ に加熱し 35 mm × 260 mm × 580 mm および 100 mm φ × 430 mm の形状のものに鍛伸し、機械加工で 30 mm × 250 mm × 570 mm のスラブおよび 95 mm φ × 420 mm のビレットとした。

熱間圧延 上記スラブを 850℃ に加熱し、熱間圧延ロールで 4 mm 厚の板にした。

冷間圧延 熱間圧延でえられた板を 750℃ で 10 分間真空中にて焼ナマシした後、表面スケールを除去し、4 段ロールで 2 mm 厚板に冷間圧延した。またこの 2 mm 厚板の一部は 650℃ で 1.5 時間真空中で中間焼ナマシを行ない、再び冷間圧延で 1 mm 厚の板にした。

熱間押出 ビレットを 850° ~ 880℃ に加熱し、熱間押出によって 10 mm φ および 20 mm φ の丸棒とした。また一部のビレットは中心を穿孔し、同様に 30 mm O.D. × 25 mm I.D. × 2,000 mm の管とした。

冷間抽伸 熱間押出によってえられた 10 mm φ 丸棒をドローベンチで冷間抽伸し 3.0 mm φ および 1.6 mm φ の線とした。

脱スケール 熱間加工後の脱スケールはチタンの場合に比べはるかに困難でソルトバスあるいは酸洗のみではほとんど脱スケールは不可能であった。報告⁽¹⁾⁽²⁾にもあるようにサンドブラストまたはショットブラストで一応のスケールを除去し、その後に硝酸で酸洗する方法、すなわち機械的手段と化学的手段とを併用して行なう必要がある。

以上の結果、加工はチタンとはほぼ同様に行なうことができることがわかった。しかし高温における酸素、チッ素との反応がはげしいので、チタン以上に細心の

注意が必要である。したがって熱間加工における加熱温度は低いほど好ましいが、材料の硬さから考えて 850° ~ 900℃ に温度を選んだ。また板の冷間圧延の中間焼ナマシは真空中で行なった。試作材の機械的性質は後述するように良好であり、汚染に注意して加工すれば良質の製品の製造が可能である。しかしながらお薄肉細管の製造法、異方性を除くための熱処理と加工法および脱スケール法の簡便化などについては検討が必要である。それぞれの問題については報告があるが、今後に残された問題である^{(2)~(4)}。

Ⅱ. ジルカロイ-2, ジルカロイ-3 の諸性質

1. 常温および高温抗張性質⁽⁶⁾

ジルカロイ-2, ジルカロイ-3 の棒試験片につき常温ならびに高温における抗張性質を試験した。また比較材として工業用純ジルコニウムについての結果を併記した。試料は第1図のような試験片に機械加工し、 5×10^{-4} mmHg の真空中で 750℃, 2 hr 焼ナマシした。

第1図 各種機械試験片

引張試験の結果は第2図に示すとおりで、チタンとよく似た傾向を示す。耐力、引張強さの試験温度上昇に対する下降の程度はいずれの材料も 300° ~ 500℃ で停

第 2 図 高温引張試験結果

滞する傾向にあり、この温度範囲でクリープ強さが強い傾向にあることがうかがえる。工業用純ジルコニウムとジルカロイ-2、ジルカロイ-3とを比較すると、常温では前者が高い耐力、引張強さをもっているが、高温になるほど後者との差異がなくなり、500 $^{\circ}\text{C}$ では後者の方が高い値を示した。伸びの試験温度上昇にともなう傾向は300 $^{\circ}\sim$ 500 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で耐力、引張強さの停滞と関連して停滞する傾向を示した。停滞温度は工業用純ジルコニウムがもっとも低い温度で起り、ジルカロイ-2がもっとも高温でおこる傾向にある。工業用純ジルコニウムの破断は300 $^{\circ}\text{C}$ までは低下し、それ以上の温度で上昇しているが、ジルカロイ-2、ジルカロイ-3はほぼ直線的に増大している。その直線の傾斜はジルカロイ-3の方がジルカロイ-2より大きい。このことはジルカロイ-2が少なくとも300 $^{\circ}\sim$ 400 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で常温の抗張性質の割りに他の材料より強い耐熱性をもっていることを想像させる。

第2図中の点線で示したものは *Technical Progress Reviews*, 1, No. 4, (1958), "Reactor Core Materials" (5) に示されているジルカロイ-2、ジルカロイ-3の高温抗張性質である。ジルカロイ-2については伸びがやや異なる傾向を示すが、総合しては本試験結果と大差ない値である。ジルカロイ-3は常温抗張性質にかなり差が見受けられるが、高温になるとともにその差は少なくなり、250 $^{\circ}\sim$ 300 $^{\circ}\text{C}$ 以上ではほとんど差異

がないと判断される。

2. クリープ・ラプチャー性質⁽⁶⁾

ジルコニウムが使用される PWR, BWR 型炉などの冷却剤の温度を考慮し、また文献との比較を勘案して600 $^{\circ}\text{F}$ (316 $^{\circ}\text{C}$)を試験温度とした。熱処理その他は引張試験試料と同一である。試験片の形状は第1図に示した。

第3図(1)～(3)に316 $^{\circ}\text{C}$ クリープ・ラプチャー試験結果を示した。ジルコニウムはチタンと同様に316 $^{\circ}\text{C}$ で特異なクリープ性質を示す。すなわちある臨界応力(引張強さにきわめて接近した)以上ではきわめて短時間で破断するが、わずか0.5 $\sim$ 1.0 kg/mm^2 程度、これより低い応力では非常に長時間で破断するか、または長時間でも破断しない。これはすでにチタンについ

第 3 図 (1) 工業用純ジルコニウムの316 $^{\circ}\text{C}$ でのクリープ・ラプチャー曲線

第3図(2) ジルカロイ-2の316℃でのクリープ・ラプチャー曲線

第3図(3) ジルカロイ-3の316℃でのクリープ・ラプチャー曲線

て種々の角度より調査したように⁽⁷⁾, 歪硬化現象と想像される。

316℃における応力-クリープ・ラプチャー時間曲線を第4図に示す。ジルカロイ-2は他に比して応力-クリープ・ラプチャー時間曲線の傾斜がもっともゆるく耐熱性のあることを示している。第4表は第4図から内, 外挿によって求めた各試料の316℃クリープ・ラプチャー強度である。第5図は316℃における各材料の応力-最小クリープ速度曲線でジルカロイ-2は工業用純ジルコニウムに比し19 kg/mm²以下の応力では

第4図 316℃における応力-ラプチャー時間曲線

第4表 クリープ・ラプチャー強度

ラプチャー時間 (hr)	クリープ・ラプチャー強度 (kg/mm ²)				
	10	100	1,000	10,000	100,000
工業用純 ジルコニウム	22.3	21.6	21.0	20.3†	19.8†
ジルカロイ-2	19.8	19.6	19.5	19.3†	19.2†
ジルカロイ-3	15.5	14.9	14.5	14.0†	13.5†

† 外挿値

低い最小クリープ速度を示している。第4, 5図中に点線で示したものは前記文献⁽⁸⁾中に示されたジルカロイ-2, ジルカロイ-3 (ジルカロイ-3は推定値)で, 本実験結果と比較するとき大きな差異は認められない。

第5図 316℃における応力-最小クリープ速度曲線

3. 機械的性質に及ぼす冷間加工の影響

熱間押出により製作した10 mmφ丸棒を冷間引抜によって4 mmφの線とし, 750℃で2 hr, 5×10^{-4} mmHgの真空中で焼ナマシした試料についてさらにドローベンチで引抜き, おおの12, 34, 60%の加工率の線とした。これらの試料について引張強さおよび硬さを測定し, これら機械的性質に及ぼす冷間加工の影響を調べた。第6図にその結果を示した。

従来の報告⁽⁹⁾によるとジルコニウムの加工硬化は2段に起るとされているが, 第6図の結果からもその傾向がみられる。これはチタンの場合にはみられないものである。また加工の初期において急速に硬化することも第6図からうかがえる。

4. 焼ナマシによる軟化試験

50%加工度を有する1 mm厚のジルカロイ板を用い, 真空中各温度に1 hr保持後焼入れしたものについて

第 7 図 ジルカローイ-2 の軟化試験結果

張強さ, 耐力, 伸び, 硬さを測定し, 焼ナマシ温度の影響を調べた。第 7, 8 図にその結果を示した。

また 37, 67% の加工度を有するジルカローイ線についても同様の試験を行なった。これは第 9, 10 図に示す。

これらの結果から, 50% 加工度の板試料では 400°C から軟化し始め, 700°C で最低値を示した。線試料についても軟化の傾向は同様で 400°~500°C から軟化を示し, 700°C で最低となる結果がえられた。

第 7 図 ジルカローイ-2 の軟化試験結果

第 8 図 ジルカローイ-3 の軟化試験結果

第 9 図 ジルカローイ線の軟化試験結果

第 10 図 ジルカローイ線の軟化試験結果

5. エリクセンおよび曲げ試験

1 mm 厚のジルカローイ板を用いエリクセン試験と曲げ試験を行なった。ジルカローイ-2 についてはエリクセン値は 7.49~7.85, ジルカローイ-3 で 6.62~6.67

であった。また曲げ試験では、ジルカロイ-2、ジルカロイ-3とも曲げ角度 180° で曲げ半径 $2t$ まで可能であった。したがってジルカロイ-2、ジルカロイ-3ともかなりの靱性を有していることが認められた。

写真3, 4にそれらの試料を示した。

写真3 ジルカロイ板のエリクセン試験

写真4 ジルカロイ板の曲げ試験

6. 溶接試験

ジルカロイ-2、ジルカロイ-3の1mm板を不活性ガスチャンバーで溶接した。すなわち試料を装置中に装入し、容器を一度高真空にした後アルゴンガスを微正圧まで充填し、直流正極性で溶接した。この溶接材から試験片をとって曲げ試験を行なった。写真5にこの曲げ試験試験片を掲げた。

写真5 ジルカロイ溶接材料の曲げ試験

ジルコニウムおよびジルカロイの溶接についてはすでに二・三の報告⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾があるが、本溶接試験の結果からもジルカロイ-2、ジルカロイ-3もチタンと同様に溶接することができることが判明した。

しかし Cox⁽⁹⁾によると、ジルカロイ-2について多

層溶接すると、ルートパスが加熱および徐冷される結果、化合物の析出がおこって脆化を示すことも報告しており、また Niemann ら⁽¹¹⁾は同じくジルカロイ-2の溶接部の化合物の析出による脆化について研究し、溶接後熱処理することによって回復せしめる試験を行っている。したがって有害なガスの汚染を防止しても、なおジルカロイの靱性は上記のような理由から低下することがあり、これらについてジルカロイの溶接方法をさらに検討する必要がある。

7. 熱処理性質

鍛伸でえた10mmφ試料を750℃、2hr真空焼ナマシしたものについて、400°~1,000℃の各温度に1hr保持後水焼入したジルカロイ-2、ジルカロイ-3の試料について硬さを測定した。第11図にその結果を示した。

第11図 ジルカロイ焼入試験結果

ジルカロイ-2、ジルカロイ-3とも700℃までは焼ナマシ硬さと同じ値を保っているが、700°~1,000℃においては温度の上昇とともに硬さは急速に増加し、1,000℃から焼入れたものは230~235 (ピッカース)の値を示した。

焼入温度が700℃までの試料はジルカロイ-2、ジルカロイ-3ともすべて α 相よりなっているが、800℃より焼入れたジルカロイ-3では α の中に α' がみられ、850°~900℃では両合金とも $\alpha + \alpha'$ 組織となり、1,000℃ではいずれも α' 組織となっている。

8. ジルカロイ-2、ジルカロイ-3の耐食性質

ジルカロイ-2、ジルカロイ-3は燃料皮覆材として使用されることがもっとも多いが、そのためには高温高圧水あるいは沸騰水中における耐食性が良くなければならない。Westinghouse のジルカロイ・ストリッ

ブ、鍛造材に対する受入検査⁽¹²⁾では、750°F, 1,500psiの高温高压水中に14日保持する試験を実施することになっている。

筆者らは試作したジルカロイ-2、ジルカロイ-3ならびに比較材として工業用純ジルコニウムの2mm厚板について、高温高压水中の腐食試験を理化学研究所金属材料研究室に依頼した。試験条件は300℃ 85 atmの純水(pH 7)で24, 72, 168, 360 hrである。第15図にその結果を示した。

ZrA: ドイツ製工業用純ジルコニウム
ZrB: 国産工業用純ジルコニウム
ZrC: 本試験比較材の工業用純ジルコニウム

第12図 高温純水腐食試験結果

この結果から明らかなように、高温高压水に対してジルカロイの耐食性は比較材の工業用純ジルコニウムに比較してきわめて良好であった。同様の条件で外国で試験されたヨード法ジルコニウムおよびジルカロイの試験結果では、 $10\text{mg/dm}^2/300\text{hr}$ 程度の腐食増加量が報告⁽¹³⁾されているので、本ジルカロイ試作品は十分実用に耐えられるものと考えられる。

9. ジルカロイの分光分析

ジルカロイの合金成分は錫ときわめて微量の鉄、クロム、ニッケルであり、これらの合金成分を規格値以内におさめ、かつその偏析を防止することが、ジルカロイ製造上もっとも重要な問題の1つである。これに

ともない溶製鑄塊または成品について、それらの合金元素を迅速かつ正確に定量分析することが製造過程における品質管理上非常に大切なことである。

ジルコニウムのスペクトルはウランのそれと似て非常に複雑であるため、合金元素の感度を高くするためには、スペクトルの複雑さとバックグラウンドによって生ずる影響を最小にするような手段を講ぜねばならない。大分散度の分光器ならびに火花励起法の使用がこの目的に合致する。一方ジルカロイの分光分析用金属標準試料を作製することは、非常に困難かつ長期にわたる問題であるが、これを化学的な溶液に合成することは容易かつ正確である。

以上のような理由により回折格子分光写真機ならびに Porous Cup Electrode を用いる溶液火花法の分析条件を確立し、中間インゴットならびに最終インゴットの数箇所から採取した削粉2gを H_2SO_4 (1:4) 溶液50ml中に溶存する溶液を分析に供した。第13図に気孔性カップ電極の説明図を示した。また第5表(次頁)にジルカロイの分光分析条件をあげた。

本法の精度を変動係数(ただし、 $n=11$)で表わせば、

Sn, Fe, Cr 2.4~3.7%
Ni 7.0%

で40試料について比較を行なった化学分析値、分光分析値の差の平均値の

検定結果は

Sn 5%有意
Fe, Cr, Ni 有意差なし

であった。分析所要時間は本法により現行化学分析(30hr)の $\frac{1}{3}$ に短縮することができた。

以上のように本分析法はジルカロイ中の合金元素中 Sn に関しては正確度は化学分析に比して若干劣るが、これを除く Fe, Cr, Ni の定量に関しては十分の実用性と信頼性を有することを確認した。

またジルコニウム中のハフニウムについては、試料を酸化物にした後、同様に格子分光写真機、ライスキー火花発生装置を用い、コーティング法によって分光分析を行なう方法を研究した。しかしハフニウムについては比較すべき化学分析法がなく、その正確度は客観的に実証される必要があったが、ジルコニウム分析研究懇談会のもとに、東京大学および筆者らを含む民間数社の研究機関が共通試料についてハフニウムの分析を行ない、数回にわたっておのおのの分析方法、分

第13図 気孔性カップ電極

析値の比較検討を重ねた結果、筆者らが研究した分析方法およびその分析値の信頼性が確認された。

第5表 ジルカロイの分光分析条件

分光写真機	エバート型 3.4 M 回折格子分光写真機 格子施条数: 600/mm 分散度: 2.5 Å/mm (2nd Order) ブレースセンタ: 5,000 Å
火花発生装置諸元	ライスキー式火花発生装置 変圧器: (1:150) 0.9kW, 抵抗10Ω 一次電圧40V, 一次電流 7A C: 0.005μF L: 0.8mH 制御間隙 3 mm, 分析間隙 2 mm 放電数: 3/半サイクル
撮影条件	スリット幅: 20μ (中間絞 No. 2) 2 段フィルター使用 予備放電: 60 sec 露光時間: 40 sec 撮影波長センター: 2,800 Å (2nd Order)
	乾板: Kodak SA-1 現像: D-19, 20°C 3 min
試料ならびに電極	試料 2g を 50ml 中に溶存する H ₂ SO ₄ (1:4) 溶液を脚長ビベットで気孔性カップ電極に充填したものを上極とする。下極は 6mmφ の炭素棒
分析線対	I Sn 3009.147 / I Zr 3005.370(f) (撰定 λ ≒0.35%Sn) I Sn 3009.147 / I Zr 3005.497(f) (撰定 λ ≒0.90%Sn) II Fe 2599.396(f) / II Zr 2586.857 (撰定 λ ≒0.17%Fe) II Cr 2677.159 / II Zr 2665.177 (撰定 λ ≒0.11%Cr) I Ni 3002.491 / I Zr 3005.370(f) (撰定 λ ≒0.085%Ni)
励起指標	I Zr 3005.370(f) / II Zr 2998.483(f) ≒1.03
露光指標 乾板校正	II Zr 2998.483(f) の透光率≒50% 7 段フィルター法

(f) はフィルター使用

■. 結 言

新たに製作した真空アーク溶解炉により、消耗電極

式二重溶解法にてジルカロイ-2, ジルカロイ-3 の鋳塊を溶製し、それから偏析がなく欠陥のない健全な鋳塊であることを確かめた。次いでこれらを熱間加工、冷間加工して板、棒、線、管などを製作し、これらにつき、機械的性質、熱処理性質、溶接試験、耐食性などについて検討を加えたが、諸外国のデータに比し全く遜色のないことを確かめた。またジルカロイ中の合金元素およびハフニウムの分光分析技術を確立した。

以上の結果、細部に至ってはなお検討の余地を残しているが、原子炉用として諸外国のものとは変わらないジルカロイ-2, ジルカロイ-3 を製作しうる基礎がえられたと信ずる。

本研究は前述したように、原子力局の原子力平和利用研究費補助金の交付を受けて実施したもので、関係各位に深甚な謝意を表する次第である。また研究の遂行にあたり、種々有益な助言をたまわった東京大学工学部付属総合試験所助教授三島良績先生、理化学研究所伊藤伍郎先生、京都大学名誉教授西村秀雄先生、京都大学教授村上陽太郎先生、高村仁一先生、大阪大学教授浅田常三郎先生、名古屋大学教授宗宮尚行先生に厚く感謝する次第である。

(1959年 8月17日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) "Zirconium Technology and Economics", A Forum Committee Report, (1955).
- (2) E. L. RICHARDS, et al.: 第2回ジュネーブ会議報告 15/p/1010, (1958).
- (3) A. A. KISELEV, et al.: 同上 15/p/2049, (1958).
- (4) G. M. ADAMSON, et al.: 同上 15/p/1993, (1958).
- (5) "Reactor Core Material", Tech. Progress Rev., 1, No. 4, (1958).
- (6) 山本俊二他: 神戸製鋼所研究報告, 神第1134号.
- (7) 山本俊二, 湯河透, 八木芳郎: 材料試験, 6, (1959).
- (8) 三島良績, 森川茂寿: 第2回原子力シンポジウム報文集, (1958).
- (9) F. G. COX: Murex Rev., 1/11 (1952), 3.
- (10) G. E. ELDER, et al.: J. Metals, 6, No.5, (1956).
- (11) J. T. NIEMAUN, et al.: Weld. Jul., 35, No.1 (1956).
- (12) Process Specification AP-292494: Westinghouse Elect. Corp.
- (13) C. TYZACK: Nuclear Engng., 3, No.24 (1958)
- (14) 中野弘一, 他: 神戸製鋼所研究報告, 神第1138号
- (15) 三好 敏: ジルコニウム分析研究懇談会第5・6回会議に報告, (昭 33).
- (16) 三好 敏: 神戸製鋼所研究報告, 神第1128号.