

球状黒鉛鑄鉄製

使用済燃料輸送・貯蔵容器の開発

櫻井 大八郎



正 誤 表

Page	行	誤	正
2	9	2.1.1	1.1.1
13		表2.4.1	表1.4.1
15	19	弾性解析	弾塑性解析
21	23	八幡製作所高炉焼	八幡製鉄所高炉焼
23	19~20	……共晶温度停滞が確認できた。 (1150℃)	……共晶温度停滞が確認できた (1150℃)。
34	1	図-3.5.2	図-3.5.3
57	13	図1	図4.3.1
57	14	表2	表4.3.1
64	11	……供晶……	……共晶……
68	21	おんば	音波
68	22	深傷	探傷
68	22	深傷	探傷
71	16	人口	人工
71	19	人口	人工
75	26	試験方方式	試験片方式
86	11	とした。(図5.3.1 参照)。	とした(図5.3.1 参照)。
108		図9.2.11	図6.2.11
133	19	[Mg]処理等によた	[Mg]処理等により
140	11~12	…VEを全快の…	…VEを前回の…
156	12	…を測定いた。	…を測定した。
176	4	…0.2%耐力が伸び絞りが…	…0.2%耐力、伸び、絞りが…
198	6~7	…我我…	…我々
198	7	…開発技術を…	…開発技術で…

①

球状黒鉛鑄鉄製

使用済燃料輸送・貯蔵容器の開発

櫻井 大八郎

球状黒鉛鋳鉄製使用済燃料輸送・貯蔵容器の開発

(Development of Spheroidal Graphite Cast Iron Cask for Transportation and Storage of Spent Fuel)

概 要

球状黒鉛鋳鉄はその強靱性を生かして、自動車部品、プレス部品等に使用されているが、鋳鉄は脆いというイメージの故に、原子力の燃料系に使用されることはなかった。

本論文は西独における鋳鉄製キャスクの開発を踏まえ、日本国内における鋳鉄製キャスクの開発に関し著者が①必要性、②鋳鉄技術の背景、③設計基準、④材料開発、⑤材料基準、⑥確証試験、等の調査、試験、研究により、いかにして開発を行ってきたかについて述べる。

Spheroidal Graphite Cast Iron have never been applied in Nuclear Fuel System because of the image that Cast Iron is brittle, although it is applied for many important car parts and press parts because of its toughness and its strength.

In this paper the author would like to mention how the development in Japan is carried out through the researches, the examinations and the studies of the followings :

- 1) Necessity, 2) Back Ground of Cast Iron, 3) Design Criteria, 4) Material Development,
- 5) Material Criteria, 6) Proof Examination.

目 次

1. 序	1
1.1 使用済燃料中間貯蔵の必要性和キャスク貯蔵	2
1.2 使用済燃料の処理方法	5
1.3 使用済燃料の処理能力	6
1.4 中間貯蔵技術の比較	11
1.5 キャスク貯蔵	14
1.6 球状黒鉛鋳鉄製キャスク実用化推進の背景	14
1.7 球状黒鉛鋳鉄製キャスクの設計基準	15
1.8 材料基準	17
1.9 本研究のねらいと構成	17
2. 球状黒鉛鋳鉄製キャスク製造技術の基礎試験	21
2.1 目的	21
2.2 試験要領	21
2.3 試験結果	23
2.4 考察	27
2.5 まとめ	29
3. 実肉厚・2/1 スケールモデル鑄造試験	30
3.1 目的	30
3.2 供試体	30
3.3 製造条件の選定	31
3.4 調査項目および調査方法	32
3.5 調査結果	33
3.6 考察	49
3.7 まとめ	55

4. 球状黒鉛鋳鉄製キャスク・フルスケールモデル鋳造試験	56	8. 総括	199
4.1 緒言	56		
4.2 試験方法	56		
4.3 調査結果	57		
4.4 考察	64		
4.5 結言	67		
5. 球状黒鉛鋳鉄製キャスク・超音波探傷技術の開発	68		
5.1 最近の技術動向と理論	68		
5.2 基本特性の調査	83		
5.3 フルスケールモデルを利用した確認試験	86		
5.4 まとめ	94		
6. 破壊靱性測定法	95		
6.1 破壊靱性測定の前備試験	95		
6.2 各種試験法による破壊靱性の評価	102		
6.3 計装化シャルピー試験を利用した動的破壊靱性評価	118		
7. 球状黒鉛鋳鉄製キャスクの信頼性の確認	137		
7.1 信頼性の確認方法	137		
7.2 確認試験に適したキャスクの形状及び構造	139		
7.3 確認試験用供試体の製造方法	140		
7.4 確認試験体の製造結果	147		
7.5 法規に基づく確認試験〔確認試験(1)〕の条件	156		
7.6 確認試験(1)結果	156		
7.7 基準の信頼性の確認試験〔確認試験(2)〕の条件	170		
7.8 確認試験(2)結果	172		
7.9 考察	191		
7.10 まとめ	198		

1. 序

日本では昭和38年10月26日東海村の日本原子力研究所の動力試験炉で初めて原子の火がともって以来、原子力発電は増加の一途をたどり、平成元年には総発電量の約30%を占めるまでに成長してきた。しかしながら発電に使用された燃料の処理（再処理）については米国の対日政策等の関係から開発が遅れ、昭和52年9月22日から東海村の動力炉核燃料開発事業団において再処理が開始されたが、昭和62年末までに再処理された使用済燃料は総量約400T-U（トンウラン：酸化ウランのウラン換算重量）にとどまっており、また、海外委託再処理は英国、仏国と委託契約を締結し、昭和62年末までに約4,800T-Uが海外へ輸送されているが、この委託契約も平成2年で終了する。このため原燃サービス側を中心にして下北半島の六ヶ所村に再処理工場を建設し、1995年から操業を開始する予定となっている。しかしながら、その再処理能力は800T-U/年であり、2000年の年間使用済燃料発生推定量約1,200～1,300T-U/年には対応できない状況にある。

また再処理により生成するプルトニウムの使用先である高速増殖炉「もんじゅ」もまだ建設中であり、プルトニウムの使用ができないため軽水炉でプルトニウムを部分的に使用する研究がなされているが、プルトニウムの混入可能量は現状では数パーセントと予定されており、将来発生するであろうプルトニウムの全量を消費することは困難である。このためエネルギーセキュリティの点から使用済燃料を一時的に中間貯蔵（発電と再処理の中間）するアイデアも出てきている。このような情勢下で国内での中間貯蔵について電力中央研究所、電力会社等で各種中間貯蔵技術（ボルト貯蔵、プール貯蔵、キャスク貯蔵）の比較検討が実施され、キャスク貯蔵が有力であることが提案された。

西独では従来からTUV（高圧容器協会）、BAM（連邦材料試験所）等によりDINに規定されている球状黒鉛鋳鉄のタービンケーシングへの適用が認められているなど、先進的な活動が実施されており昭和53年から使用済燃料輸送・貯蔵容器を球状黒鉛鋳鉄により製造するための研究開発が行なわれ、昭和58年にはゴアレーベン中間貯蔵施設における輸送・貯蔵の連邦政府認可を得た。

球状黒鉛鋳鉄は晶出黒鉛が球状化しているため鋼材に近い強靱性を得ることが可能であり、また成分系を適正に選択することにより凝固収縮をなくすることが可能であることおよび鋳造温度が低くてもよいこと、ならびに晶出黒鉛の存在のため被割性がよいことなどから、経済性に極めて優れた材料であり、もし日本国内における実用化がはかれれば産業界に与えるインパクト

は強烈であり、低迷している鋳造業界を活性化させる可能性がある。

そこで、昭和59年から本開発に着手し、基礎試験（S59-60） $\frac{1}{2}$ モデル試験（S60-61）、実物試験（S61-62）、確証試験（S62-H1）を実施し、ほぼ実用化の目途をつけたのでここに報告する。

1.1 使用済燃料中間貯蔵の必要性和キャスク貯蔵

1.1.1 原子力発電量と使用済燃料発生量

前述のごとく昭和38年の初発電以来現在までに商業用軽水炉はすでに35基(2,788万kW)が運転中であり、12基(1,199万kW)が建設中である。これらの原子力発電所の立地点を図2.1.1に示す。

ところで昭和62年10月に発表された総合エネルギー調査会の見通しによると原子力発電需要は平成7年度(1995年度)で4,150万kW、平成12年度(2000年度)では5,350万kW程度と推定されている(表-1.1.1)。また科学技術庁原子力局核燃料課の試算(表-1.1.2)によると、使用済燃料発生量は、平成2年度(1990年度)800T-U/年、平成7年度(1995年度)1,100T-U/年としている。これから平成12年度(2000年度)を推定すると約1,420T-U/年、平成17年度(2005年度)約1,720T-U/年となる。



図-1.1.1 日本における原子力発電所立地点¹⁾

表-1.1.1 長期エネルギー需給見通し¹⁾ (総合エネルギー調査会需給部会見通し)

項目 エネルギー需要区分 エネルギー別	年度	昭和61年度(実績)		昭和70年度		昭和75年度		昭和80年度(試算)		この見通しは、民間の最大限の理解と努力のもとに、政府の総合的なエネルギー政策の重点的な計画的な遂行を前提とした場合のエネルギー需給見通しを示すものである。
		実数	構成比(%)	実数	構成比(%)	実数	構成比(%)	実数	構成比(%)	
石炭		10,390万t	18.3	12,100万t	18.3	13,600万t	18.7	15,000万t程度	19程度	1.
原子力		2,580万kW	9.5	4,150万kW	13.4	5,350万kW	15.9	6,500万kW程度	18程度	2.
天然ガス		4,280万kW	9.9	5,500万kW	11.1	5,800万kW	10.8	6,000万kW程度	10程度	3.
(うち国内天然ガス)		(21億m ³)		(36億m ³)		(42億m ³)				
(うちLNG)		(2,880万t)		(3,600万t)		3,800万t				
水力		2,020万kW	4.2	2,300万kW	4.5	2,450万kW	4.4	2,600万kW程度	4程度	
(一般水力)		{ 1,560万kW		{ 1,950万kW		{ 2,100万kW		{ 2,250万kW程度		
揚水		40万kW	0.1	200万kW	0.4	440万kW	0.8	600万kW程度	1程度	
地熱		550万kW	1.3	1,250万kW	2.5	2,450万kW	4.5	4,000 ~ 5,200万kW	7 ~ 9	
新エネルギー等		2,46億kW	56.8	2,45億kW	49.7	2,42億kW	45.0	2.4 億kW程度	42程度	
石油		(70万kW)		(130万kW)		(160万kW)				
(うち国内石油)		(1,620万t)		(1,800万t)		(1,900万t)				
(うちLPG)										
合計		4,33億kW	100.0	4.9 億kW	100.0	5.4 億kW	100.0	5.8 億kW程度	100	

(注) 1. 原油換算は 9,250kcal/ℓ による。
2. 新エネルギー等の欄には、太陽エネルギー、オイルサンド・シェール油、アルコール燃料、石炭液化油、黒液(パルプ廃液)、新炭等を含む。
3. 構成比の各欄の数字の合計は、四捨五入の関係で、100にならない場合がある。

年 度	年間発生量 T-U	累積発生量 T-U
S61 1986	610	4,200
H2 1990	800	7,500
H7 1995	1,100	12,400

(ガス炉を除く) (原子力局核燃料課試算)

1.2 使用済燃料の処理方法

このように将来的に年間 1000T-U を超えて発生してくる使用済燃料の処理方法のオプションとして次の3種類が考えられている¹⁾。

- ① 再処理を行ないプルトニウム燃料等を取り出す。
- ② 再処理は全く考えないで一定期間貯蔵した後最終処分する。
- ③ 将来的な再処理に備えて、当面一時的に中間貯蔵し、他のエネルギーコストの状況を見ながら必要があれば再処理を行なう。

日本では原子力政策としては従来、これらのオプションのうち再処理を行なうことを原則としてきたが、昭和62年6月22日原子力委員会により、原子力開発利用長期計画が決定され、「再処理は国内で行なうことを原則とするが、国内再処理能力を上回る使用済燃料については、再処理されるまでの間適切に貯蔵・管理する。」という中間貯蔵の概念が導入された¹⁾。従って国内の使用済燃料の処理方法としては再処理および中間貯蔵の二方法が検討対象となる。

1.3 使用済燃料の処理能力

現時点で稼働中および計画中の処理施設としては次のものが上げられる¹⁾。

- ① 動燃・東海再処理工場（処理能力0.7T-U/日）〔稼働中〕
- ② 原燃サービス㈱・下北再処理工場（処理能力800T-U/日）〔建設中〕

<1990年代半ば（平成7～8年頃）稼働予定>

- ③ 同上・下北水プール（貯蔵能力3000T-U）〔建設中〕

<1991年（平成3年）稼働予定>

- ④ 各発電所・on site水プール（貯蔵能力10年分）〔稼働中、建設中〕
- ⑤ 海外委託再処理（契約再処理量4,000T-U）〔1990年（平成2年）まで〕

ところで、表-1.3.1に動燃・東海再処理工場の運転実績を示すが、公称能力0.7T-U/日（365日稼働とすると250T-U/年）に対し最大年間処理実績は昭和61年7月～昭和62年5月の94.2T-Uであり、稼働率はたかだか40%程度、年間処理能力100T-U/年と推定される。……
…………… (1)

次に海外委託再処理について検討するが、表-1.3.2に各国の再処理施設を示す。このうち日本が海外委託再処理契約を締結しているのは、イギリスおよびフランスであり、日本の使用済燃料である濃縮ウランに対応できるのは、イギリスのTHORPとフランスのUP-2およびUP-3のみである。イギリスのTHORPは現在建設中であり1992年の操業開始予定であり、フランスのUP-3も同様に1989年の操業開始予定であったが、1990年6月現在操業開始していない。UP-2は、著者が昭和62年8月に原産会議派遣の調査団に参加し、調査した結果²⁾では、マグノックス燃料を処理対象としていたが1987年1月に運転中止され、1992年操業開始目標で濃縮ウラン用にUP-2-800として改造中である。またアメリカ、ベルギーでは経済性、安全性の点から既に運転停止し閉鎖されている。

諸外国の中で濃縮ウラン用として唯一稼働していたのは西独のWAKであるが、1989年西独は再処理の中止を決定し、1992年末頃休止予定である。

WAKの稼働状況についてはH.O.WillaxらがRECOD'87で報告³⁾しており1971年から1987年6月までに計185Tのウランと1,050kgのプルトニウムを再処理したとしている。図-1.3.1に各燃料サイクル⁴⁾を示すがこれから使用済燃料25T-Uから減損ウラン24T-Uおよびプルトニウム226kgが再生されることがわかる。従って西独のWAKでは1971年から1987年までの間に約120T-Uの使用済燃料が再処理されたものと推定される。

表-1.3.1 東海再処理施設の運転実績¹⁾

キヤンペーン 期	試運転	C-1	C-2	81-1A	81-1B	81-2A	81-2B	82-1A	82-1B	82-1C
		S55 4～7	S55 9～11	S56 1～3	S56 5～6	S56 9～12	島根1号機 美浜1号機 美浜2号機	S57 1～3	S57 4	S57 5～6
原子	JPDR 島根第1号機 美浜第1号機 美浜第2号機	JPDR 島根第1号機 美浜第1号機 美浜第2号機	玄海1号機 美浜1号機 美浜2号機	福島第1号機 浜岡1号機	浜岡1号機 福島第1号機 福島第2号機	玄海1号機	島根1号機	伊方1号機	東海第2号機	伊方1号機 美浜2号機
集 合 体 数	157	157	56	34	107	14	43	76	22	18
処理数 [*] (tU)	31.1	28.5	19.5	6.6	20.2	5.6	8.4	14.8	4.1	7.2
										2
										0.8

キヤンペーン 期	試運転	83-1	83-2	85-1A	85-1B	85-1C	85-2	86-1	86-2	87-1	合 計
		S58 2～3	S58 12	S60 2～3	S60 4～5	S60 6～8	S60 9～11	S61 7	S61 8～12	S62 1～5	
原子	東海第2号機 美浜2号機 玄海1号機 島根1号機	玄海1号機	東海第2号機	玄海1号機	島根1号機 東海第2号機 伊方1号機 美浜1号機	美浜1号機 東海第2号機 福島第1号機 福島第2号機	福島第1号機 福島第2号機 浜岡1号機 福島第1号機 玄海1号機	伊方1号機	美浜1号機 福島第1号機 福島第2号機 浜岡1号機 新設転換炉(44t)	伊方1号機 島根1号機 東海第1号機 浜岡1号機 福島第1号機	-
集 合 体 数	65	3	10	13	101	96	131	13	205	247	1,580
処理数 [*] (tU)	20.1	1.2	1.9	5.2	22.8	21.2	29.5	5.2	40.3	48.7	347.0

* 原子炉装置時の重量

注) 合計は、個々の処理量の和と計算手法上異なる。

表-1.3.2 各国の再処理施設一覧(1)

ベストモデルとして1995年から操業開始し、2005年に最大処理能力40%即ち320T-U/年に達するものとする。…………… (3)

上記下北の再処理工場に含まれる水プールは予定通り3000T-Uの能力で1991年から貯蔵できるものとする。…………… (4)

各発電所の原子炉に附属する水プールについては設計通り10年分の燃料が貯蔵できるものとする。…………… (5)

以上の検討結果をまとめると図-1.3.2のごとくなり、すべての条件が現在のベスト・コンディションで達成されたとしても2006～2007年には使用済燃料の発生量が処理量を上まわることになる。

しかしながら、①発電所内の水プールを使用済燃料でいっぱいになると新燃料の貯蔵が不可能となり、またトラブル時のバイパスができなくなる。②下北・再処理工場の建設が遅れ気味である。③原子力発電所の建設時期によって、既に水プールに納めきれない使用済燃料が発生しはじめている。などの理由から、現状の、再処理および水プールに加える処理方法が必要となってくる。

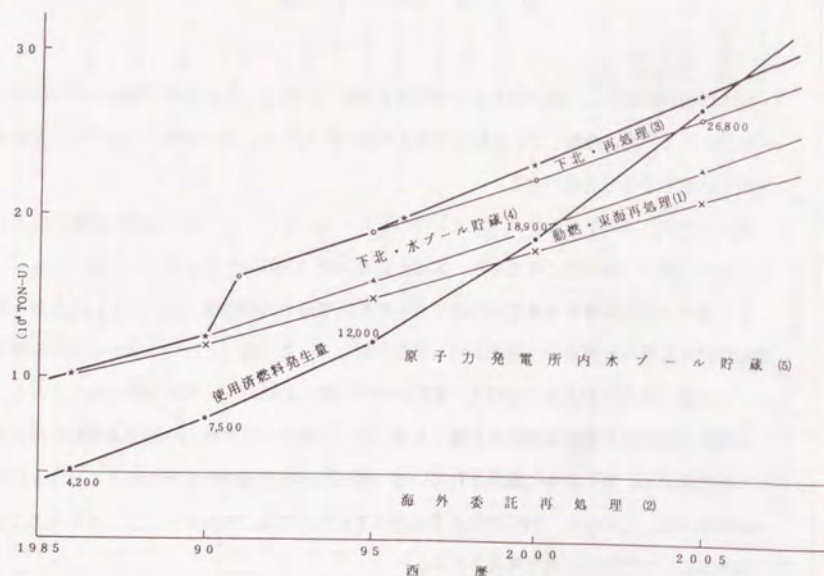


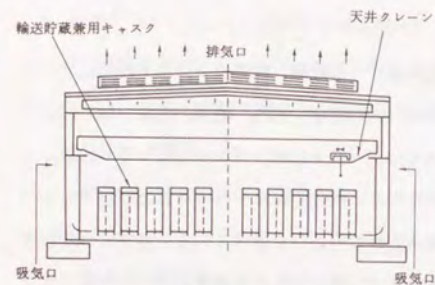
図-1.3.2 使用済燃料発生量と処理能力量(累積)

1.4 中間貯蔵技術の比較

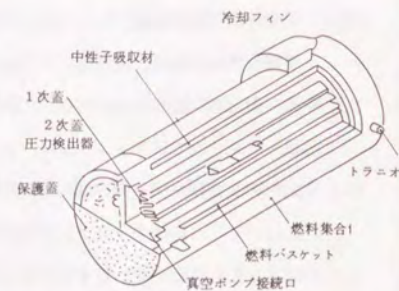
使用済燃料の中間貯蔵技術としては、湿式の水プール貯蔵、乾式のボルト貯蔵、サイロ貯蔵、キャスク貯蔵などがあり⁴⁾、各国の事情(人口密度、地質、地震、国境 etc)により、西独・アメリカではキャスク貯蔵、イギリスではボルト貯蔵、カナダではサイロ貯蔵、スウェーデンでは水プール貯蔵などが研究されており、西独ではアーハウスおよびゴアレベンにおいて²⁾、鋳鉄キャスクによる中間貯蔵施設が政府認可を受けている。各方式の概念図を図-1.4.1に示すが、日本での各方式についての比較については電力中央研究所で検討されており^{4)・5)・6)}、その結果をここでは紹介する。

表-1.4.1にポイント・カウント方式による各貯蔵方式の比較を示す。この結果によると日本においては水プール貯蔵およびキャスク貯蔵が、他の方式よりも受け入れられやすいことがわかる。そこで水プール貯蔵とキャスク貯蔵について経済性を比較すると図-1.4.2のようになり、特に原子力発電所内での貯蔵(AR貯蔵)についてはキャスク貯蔵が水プール貯蔵の60%程度の管理費用で貯蔵できることになる。

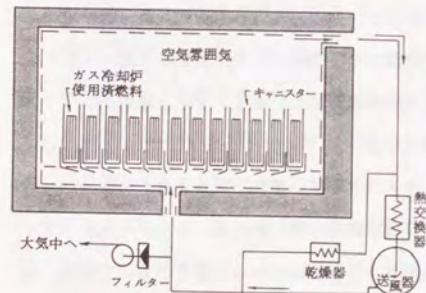
以上の検討結果から中間貯蔵技術として、キャスク貯蔵が優れていると考えてよいが、著者は日本の特殊性、即ち地震が多いことおよび飛行機等の飛行物が多いことから大型水プール建設の困難さおよび飛来物に対する防御の困難さなどの視点から容器そのもので耐震、耐衝撃性を保持することが可能なキャスク貯蔵が最もすぐれた方法であると考える。



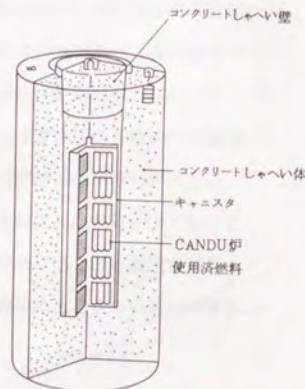
キャスク貯蔵方式の概念図 (西独)



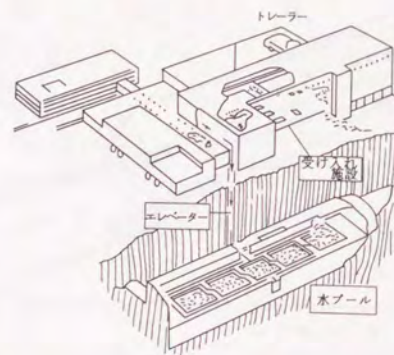
CASTOR-V概念図



閉サイクル・プール貯蔵方式の概念図
(英国ウィルフア発電所)



サイロ貯蔵方式の概念図
(カナダAECL)



地下式水プール貯蔵方式の概念図 (スウェーデンSKB)

図-1.4.1 使用済燃料貯蔵方式の概念図⁴⁾

表-2.4.1 各種貯蔵方式の予備的評価結果^{4), 6)}

評価 カテゴリー	重み点	湿式	乾式			
		水プール	ボールド	サイロ	ドライウェル	キャスク
経済性	16	13.6	14.9	13.9	14.9	16.0
安全性	16	13.6	13.2	14.8	15.6	15.4
許認可性	15	15.0	9.0	12.0	12.0	12.0
社会的受入れ可能性	13	12.2	11.1	11.5	11.5	13.0
運転特性	12	9.7	8.9	9.7	9.7	12.0
技術的特性	11	11.0	9.0	7.5	8.5	10.7
環境影響特性	9	9.0	9.0	9.0	7.5	9.0
保障措置特性	8	7.1	8.0	4.7	4.7	7.5
合計	100	91.5	83.1	83.1	84.4	95.6
評価の順位	—	①	③	③	③	①

(注) データ・ベースは各国の文献調査にもとづく

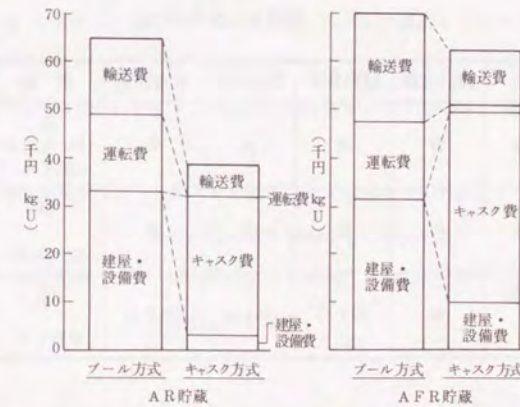


図-1.4.2 使用済燃料管理コスト評価結果
(本スタディで設計した各方式の費用見積りにもとづく)^{4) 5) 6)}

表-1.5.1 キャスクの種類

鋼板製キャスク	HZタイプ, Excelloタイプ, REAタイプ
鍛鋼製キャスク	TN-24
ダクタイル鋳鉄製キャスク	Castorタイプ, TN-1300

1.5 キャスク貯蔵

キャスク貯蔵はキャスクと呼ばれる密封容器の中に使用済燃料を封入し貯蔵する方法である。キャスクは、中性子線を吸収あるいは減衰させる物質（例えば鉛など）をサンドウィッチし、 γ 線を減衰させるに十分な肉厚を持った壁、蓋などから構成され、外部には空冷のためのフィンがついている。

現在までに実用に供されているキャスクは主たる構造材の種類により表-1.5.1のように分類されるがこの中で貯蔵用として実績のあるのは Castor タイプのみであり、他は主として輸送用のみに使用されている。これらの各種類についての比較を表-1.5.2 に示すが、この表から鋼板製は許認可性がよく、稠密度が高いが非常に高価であり、鍛鋼製は許認可性はよいが稠密度は中くらいで、価格も中くらい、ダクタイル鋳鉄製は許認可性、稠密性に課題はあるが非常に安価であることがわかる。そこで著者らは、ダクタイル鋳鉄の許認可性を高めることによりダクタイル鋳鉄製キャスクの日本における実用化を推進しようと決心した。

表-1.5.2 各種キャスクの比較

キャスク種類	設計基準	材料基準	製造技術	検査技術	密度	価格
鋼板製	有	有	有	有	高 (Pb などが 使える。) $\rho \approx 11.3$	高 $\approx 3a$ 円/T-U
鍛鋼製	有	有	有	有	中 $\rho \approx 7.85$	中 $\approx 2a$ 円/T-U
ダクタイル鋳鉄製 (球状黒鉛鋳鉄)	無	不十分	不十分	不十分	低 $\rho \approx 7.0$	安 a 円/T-U

1.6 球状黒鉛鋳鉄製キャスク実用化推進の背景

著者らが球状黒鉛鋳鉄製キャスクの実用化推進に着手した理由は技術的には前述の通りであるが、その背景としては以下のような理由がある。

- ① 大型鋳造業界は昭和48年当時の生産量約1万トン/年に対し最近では約1千トン/年と生産量が激減しており、このままでは業界が成立しなくなり、日本の大型鋳造技術が消滅しかねないこと。

- ② 鉄鋼業は国内総発電量の約1/4を使用しており、電力単価の変動が直接鉄鋼業の採算性に影響を与えること。
- ③ 日本の鋳造技術は世界的に最高水準であり西独で実用化できているものが日本でできないはずがないと考えられたこと。
- ④ 現在まで原子力用部材で燃料に直接触れる部材に鋳鉄が使用されたことがなく、キャスクが実用化すれば球状黒鉛鋳鉄の用途が大きく開けると推測できること。
- ⑤ 類似品を製造する技術および設備が既にあり、多大な投資を行わなくても開発が可能であること。

1.7 球状黒鉛鋳鉄製キャスクの設計基準

原子力設備の設計基準としては有名なものに A S M E Code Sec. XI, 通商産業省告示第501号などがあるが、球状黒鉛鋳鉄製輸送・貯蔵兼用キャスクについてはそのまま適用するには無理があるため、(財)電力中央研究所を中心として鋳鉄キャスク品質保証研究会において、西独における Castor タイプの安全解析報告書、B A M の鋳鉄キャスクに関するセミナーレポート、米国 N R C の NUREG/CR-3760等を参考にして、鋳鉄キャスクの設計基準について検討した。その結果は表-1.7.1⁷⁾に示すが、設計基準としては次の二つの基準が提案されている。

- ① 延性破壊防止基準 …… 最大せん断応力説又は最大主応力説により、最小引張強さ又は最小降伏点を基準として設計する。
- ② 脆性破壊防止基準 …… 弾性解析により最大応力を求め欠陥サイズと破壊靱性値から安全性を確認する。

表-1.7.1 鋳鉄キャスクの設計クライ

(1) 延性破壊防止クライテリア (案)

球状黒鉛鋳鉄製キャスクに対する延性破壊防止クライテリアとする。また、右辺の一定応力値については、次の1)から4)のいずれかによる評価方法及び最大主応力説による評価は、次の1)から4)のいずれかによる評価。

1) 最大せん断応力説による評価

通産省告示第501号の第1種容器による。

a. 通常状態、一般の試験条件

- (a) 一次一般膜応力強さ P_m により評価することを否定するものではない
- (b) 一次局部膜応力強さ P_L
- (c) 一次膜応力と一次曲げ応力を
- (d) 疲れ累積係数 ≤ 1
- (e) 一次+二次応力振幅 S_a によるモデル化を行い、キャスク各部に発生する応力分布を解析し、次のような条件が満足されることを確認する。
 - (i) 応力集中および熱による応力増大のうち、表面応力が最大となる部分を評価し、 S_a が S_m 以下。この場合はこれに準じた領域とする。
 - (ii) ピーク応力強さの振幅 S_a を乗じて割増した後に、膜応力に区分する。) 応力区分に当ってはAのこと。
 - $S_a \leq 3 S_m$ に対し
 - $S_a > 3 S_m$ に対して
 - (iii) 球状黒鉛鋳鉄の温度が
 - (iv) 球状黒鉛鋳鉄の降伏強さ S_y との比が、

b. 特別の試験条件 (事故時) 半円形の表面欠陥を想定する。欠陥の深さ (比) は $1/6$ とする。

- (a) $P_m \leq 0.5 S_a$
- (b) $P_L \leq 0.75 S_a$ (場合)
- (c) $P_L + P_b \leq 0.75 S_a$

c. 全応力強さの範囲

通常状態、一般の試験状態及び $(2\sigma_B + \sigma_b)^2$ の10サイクルに相当する許容線半径)

d. 設計応力強さ (S_m)

次の値のうち小さい方を設計値

- (a) 室温での最小引張強さの $1/2$
- (b) 使用温度での最小引張強さの
- (c) 室温での最小降伏点の $1/2$
- (d) 使用温度での最小降伏点の $1/2$ 及び寸法 a の値、内部欠陥においては、

2) 最大主応力説による評価 されないこと。万が一、検出された場合に電算機または手計算により応力を評価を行なう。

a. 通常状態、一般の試験条件

- (a) 圧力による応力 $\leq S_a$ (S_a)
 - (b) 圧力による応力+熱応力+後
- ただし、貫通に対しては除外

表-1.7.1 鋼鉄キャスクの設計クライテリア (案)⁷⁾

(1) 延性破壊防止クライテリア (案)

球状黒鉛鋳鉄製キャスクに対する延性破壊防止クライテリアとして、最大せん断応力説による評価方法及び最大主応力説による評価方法の2つを設計手法として推奨する。評価については、次の1)から4)のいずれかによる。

1) 最大せん断応力説による評価

通産省告示第501号の第1種容器に準じて最大せん断応力説によって評価する場合は次による。

a. 通常状態、一般の試験条件

- (a) 一次一般膜応力強さ $P_m \leq S_m$
- (b) 一次局部膜応力強さ $P_L \leq 1.5 S_m$
- (c) 一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ $P_L + P_b \leq 1.5 S_m$
- (d) 疲れ累積係数 ≤ 1
- (e) 一次+二次応力振幅 $S_a \leq 3 S_m$

ただし、次のような条件が満たされれば、 S_a が $3 S_m$ を上回ってもよいものとする。

(i) 応力集中および熱による曲げ応力を除いた
— S_a が S_m 以下。

(ii) ピーク応力強さの振幅 S_a に次の係数 K_a を乗じて割増した後に、疲れ強さの評価を行うこと。

$$S_a \leq 3 S_m \text{ に対し } K_a = 1.0$$

$$S_a > 3 S_m \text{ に対して } K_a = 5$$

(iii) 球状黒鉛鋳鉄の温度が370℃を超えない。

(iv) 球状黒鉛鋳鉄の降伏強さの最小値と、破断強さの最小値との比が、0.8を下まわらぬ。

S_m : 設計応力強さ
 S_n : 設計応力振幅
 K_e : 割増係数
 P_b : 一次曲げ応力
 S_u : 設計上の最小引張る強さ

b. 特別の試験条件 (事故時)

- (a) $P_m \leq 0.5 S_a$
- (b) $P_L \leq 0.75 S_a$
- (c) $P_L + P_b \leq 0.75 S_a$

c. 全応力強さの範囲

通常状態、一般の試験状態及び事故時における最終的全応力強さの範囲は、設計疲れ線図の10サイクルに相当する許容繰返しピーク応力強さの2倍以下。

d. 設計応力強さ (S_m)

次の値のうち小さい方を設計応力強さとする。

- (a) 室温での最小引張強さの1/4
- (b) 使用温度での最小引張強さの1/4
- (c) 室温での最小降伏点の1/2
- (d) 使用温度での最小降伏点の1/2

2) 最大主応力説による評価

電算機または手計算により応力を求め、最大主応力説により評価する場合は次による。

a. 通常状態、一般の試験条件

- (a) 圧力による応力 $\leq S_a$ (S_a : 許容引張応力)
 - (b) 圧力による応力+熱応力+衝撃応力 $\leq \sigma_y$ (σ_y : 降伏応力)
- ただし、貫通に対しては除外とする。

b. 特別の試験条件

圧力による応力+衝撃応力 \leq 一定の応力値

ただし、落下試験II (貫通) に関しては除外とする。また、右辺の一定応力値については現在検討中である。

c. 許容引張応力 (S_a)

次の値のうち小さい方を許容引張応力とする。

- (a) 室温での最小引張強さの0.2倍
- (b) 使用温度での最小引張り強さの0.2倍

3) 前述の1)と2)の併用による評価

4) 1)~3)は推奨方式であり、他の適切な手法により評価することを否定するものではない。

(2) 脆性破壊防止クライテリア (案)

1) 応力の算出

欠陥の存在しない状態のキャスクについて適切なモデル化を行い、キャスク各部に発生する応力を算出する。キャスク本体に対しては弾性解析を実施する。

板厚方向全域にわたって引張応力が発生する領域のうち、表面応力が最大となる部分を評価対象として選定する。該当領域が存在しない場合はこれに準じた領域とする。

2) 応力の区分

応力を以下の各成分に区分する (熱応力は曲げ応力に区分する。) 応力区分に当ってはASME Sec. XIの方式等を参考とする。

- σ_m : 一次膜応力
- σ_b : 一次曲げ応力
- σ_n : 二次膜応力
- σ_{nb} : 二次曲げ応力

上記(2-1)で選定した応力と直角方向の鋭い半円形の表面欠陥を想定する。欠陥のアスペクト比 (だ円の短軸の半径と長軸の直径との比) は1/6とする。

4) 限界き裂寸法の算出 (最大応力が降伏点以下の場合)

$$a_c = \frac{K_{IS}^2 Q}{\pi \{ 1.1 M_K (2 \sigma_m + \sigma_n) + M_B (2 \sigma_b + \sigma_{nb}) \}^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

a_c : 限界き裂寸法 (仮想欠陥のだ円の短軸の半径)

K_{IS} : 材料の基準破壊靱性値

Q : 形状係数

M_K : 膜応力補正係数

M_B : 曲げ応力補正係数

5) 評価

製造キャスクに対し、表面欠陥においては限界き裂寸法 a_c の値、内部欠陥においては、限界き裂寸法 a_c の2倍の値を超える欠陥が検出されないこと。万が一、検出された場合には、欠陥の形状、方向等について吟味し、詳細な評価を行なう。

1.8 材料基準

球状黒鉛鋳鉄の材料規格についてはいずれも肉厚 200mm以下のものを対象としており、鋳鉄キャスクのように肉厚 400mmを超えるようなものは対象とされていない。そこで Castor タイプの材料基準および NUREG/CR-3760の提案を表 1.8.1⁷⁾に示す。この2つの案の双方を加味して本研究では次の値を目標値とした。

0.2%耐力 $\geq 20\text{kgf/mm}^2$

引張強さ $\geq 32\text{kgf/mm}^2$

伸 び $\geq 12\%$

なお欠陥サイズ、破壊靱性値については、とりあえずそれぞれ $\phi 10$ 以下、 $160\text{kg/mm}^{3/2}$ 以上を目安とした。

表-1.8.1 ラウンドロビン材料試験結果(要約)⁷⁾

項 目	試 験 結 果		参 考 値	
	平均値	最小値	米 国	西 独
0.2%耐力 (kgf/mm^2) (室 温)	22.4	20.5	20 (CASTOR-V)	18 (TN-1300)
引張強さ (kgf/mm^2) (室 温)	35.3	33.6	26 (CASTOR-V)	33 (TN-1300)
伸 び (%) (室 温)	15.1	12.2	12 (NUREG/CR-3760)	12 (TN-1300)
破壊靱性値 ($\text{kgf/mm}^{3/2}$) (-40°C)	K _{1c}	220	160 (CASTOR-V)	—
	K _{1d}	174	—	—

1.9 本研究のねらいと構成

球状黒鉛鋳鉄の製造技術や材料特性に関しては既に優れた報告^{8), 9), 10), 11)}が出されているが、キャスク用材料としては

- (1) 肉厚 500mmを超えるような大型厚肉材料に関しては全くデータがない。(肉厚 200mm以下が大部分である。)
- (2) 破壊靱性を求める方法が明確化されていない。

(3) 非破壊検査方法（特に内部欠陥を対象とした）が明確化されていない。

等の点において未知であり、球状黒鉛鑄鉄をキャスク用材料として適用するには難があった。

本研究においてはこれら未知な点を明確にし、球状黒鉛鑄鉄製キャスクの信頼性を高め、実用化を図ることを目的として実施するものであり、以下の内容により構成されている。

(1) 基礎試験（第2章）

肉厚 500mmの無限円筒とほぼ等しい凝固モジュラス（体積／表面積）を持つ円柱鑄造体を鑄造し、現状における工場作業水準で、どのような球状黒鉛鑄鉄が製造できるのかを確認するとともに 1.8節で述べた目標値を達成するための開発課題の抽出を行なった。

(2) 1／2スケールモデル鑄造試験（第3章）

基礎試験で得られた知見をもとに、1.8節に示される目標値を達成するための材料設計を行ない、実物と同一の肉厚を持ち、高さを1／2とした底付円筒を鑄造し、材料製造技術の信頼性を確認するとともに、次ステップで実施する予定のフルスケールモデル鑄造試験に向けての検討課題を抽出した。同時にフルスケールモデル設計に必要な各種材料特性値を求めた。

(3) フルスケールモデル鑄造試験（第4章）

1／2スケールモデル鑄造試験で得られた知見をもとに実物サイズの球状黒鉛鑄鉄製キャスク素材を鑄造し、それまでの検討内容、材料設計、製造技術の信頼性を確認するとともに鑄造体各部位における材料特性を把握した。

(4) 超音波探傷試験法の開発（第5章）

従来鑄鉄は超音波の減衰が激しく、厚肉鑄造品の非破壊検査としては適用できないと考えられてきたが1／2スケールモデル、フルスケールモデル鑄造体を用いて、球状黒鉛鑄鉄でも探傷条件を適切に選択すれば、十分適用可能であることを示した。

(5) 破壊靱性測定法の開発（第6章）

従来の破壊靱性測定法では破壊の起点となるような欠陥や組織が比較的少量である材料を対象としていたが、球状黒鉛鑄鉄では黒鉛が9 vol. %程度含まれており、従来の概念で扱えられるか否か判然としなかった。また設計基準から与える材料特性値として、静的破壊靱性を用いるかあるいは動的破壊靱性を用いるかが明確化されていなかった。さらにA

STM E399 に従って Validな K_{Ic} を求めるためには非常に大きな試験片を用いる必要があり実用上の困難があった。

これらの課題を明確化し、実用的な破壊靱性測定法について検討を加え1／2スケールモデル、フルスケールモデル鑄造体を用いた試験を実施し破壊モデルとともに計装化シャルピー試験を用いた実用的な破壊靱性測定法を提案した。

(6) 球状黒鉛鑄鉄製キャスクの信頼性の確認

基礎試験から破壊靱性測定法までの研究開発で得られた知見をもとに確認試験用キャスク供試体を製作し、我々の研究成果の確証を実施し、材料設計技術・製造技術が確立されていることを確認した。

また、キャスク供試体に人工欠陥を導入し、設計基準および材料基準を満足すれば、 $-40^{\circ}\text{C} \cdot 9\text{m}$ 自然落下の条件では脆性破壊が発生しないことを実証し、さらに設計基準の妥当性を確認した。

以上の内容をフローとして表わすと図-1.9.1 となる。

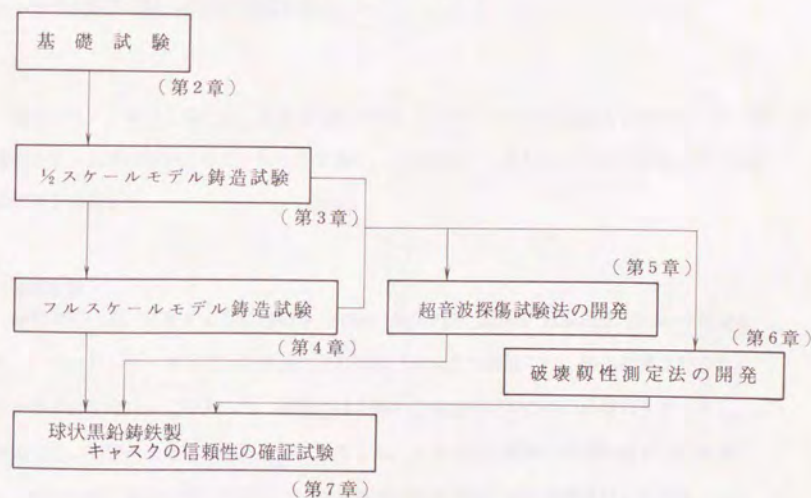


図-1.9.1 本研究の全体構造フロー

- 1) 科学技術庁原子力局 : 原子力ポケットブック (昭和63年版)
- 2) (株)日本原子力産業会議 : 再処理・廃棄物管理に関する欧州視察団報告書 (1987.10)
- 3) H.O. Willax 他 : Proceedings of RECOD' 87 P203. vol.1 (1987.8)
- 4) 松岡 實 : 原子力工業 vol.31No.7 (1985)
- 5) T. Saegusa 他 : Proceedings of RECOD' 87 P333 vol.1 (1987.8)
- 6) 電力中央研究所 : 日本原子力産業会議輸送ワークショップ資料 (1987.7)
- 7) 鑄鉄キャスク品質保証研究会 : 電力中央研究所報告 研究報告 L87007 (昭和62年11月)
- 8) 球状黒鉛鑄鉄の理論と実際 (1966) 丸善
- 9) 鑄造技術講座4 特殊鑄鉄鑄物 (1967) 日刊工業新聞社
- 10) ダクタイル鑄鉄の進歩 日本ダクタイル鑄鉄協会
- 11) 球状黒鉛鑄鉄の機械的性質試験に関する研究 日本強靱鑄鉄協会

2. 球状黒鉛鑄鉄製キャスク製造技術の基礎試験

球状黒鉛鑄鉄は凝固時間、主成分系、不純物元素（主原料）、鑄造方法等によって、その機械的性質が変化する^{8)・9)・10)}。そのため鑄造工場によって入手できる原材料、実行可能な鑄造方法を前提として製造技術を構築していかなければならない。

又鑄鉄製キャスクはそのサイズが外径約 2.5m、内径 1.5m、肉厚約 500mm、長さ約 5m と巨大なものとなることが予想され、このような巨大な鑄造物は①凝固時間が長い。②このため偏析が大きくなる。③鑄造時の鑄型に働く浮力、圧力が巨大となる。④鑄造時の鑄型の熱膨張と鑄物収縮の絶対値が巨大となる。等の理由から製造技術としては極めて高度なものが要求される。加えてこのような鑄造品に関する文献、実績が乏しいことから製造技術の開発を基礎試験・1/2スケールモデル試験・フルスケールモデル試験の3ステップに分けて実施することにした。

まず原点を定めるため、500mm肉厚の無限円柱の凝固モジュラスにほぼ等しい凝固モジュラスを持つφ640mm金型による基礎試験を実施し、次ステップの実肉厚・1/2高さの1/2スケールモデル鑄型試験への検討課題を抽出した。

2.1 目 的

著者の属する鑄造工場において実施可能であるプロセスで球状黒鉛鑄鉄を鑄造し、その機械的性質、金属組織がどのようなものであり、何を開発すべきなのかを確認する目的で本基礎試験を実施した。

2.2 試験要領

鑄型は図-2.2.1に示すように内径φ 640mm、側面肉厚 150mm、底部肉厚 200mmの金型を用い、オープンモールドで上注ぎ法により高さ 540mmまで鑄造した。鑄込温度は1310℃、Mg処理温度は1440℃であった。鑄型には上部から温度測定のための熱電対をセットし、鑄型中央、中間、表面の3箇所を連続測音した。主原料は八幡製作所高炉焼を用い吹酸により成分調整、温度調整を実施した。Mg処理は置注ぎ法により接種はMg処理後、10分でFe-75%Si3kg/Tにより実施し、接種後10分で鑄込みを行なった。得られた化学成分を表-2.2.1に示す。なお処理量は22TON 鑄込量 1.3TONであった。

鑄造後常温まで冷却し、ガス切断後機械加工により図-2.2.2に示すように試験片を採取し、各種試験に供した。

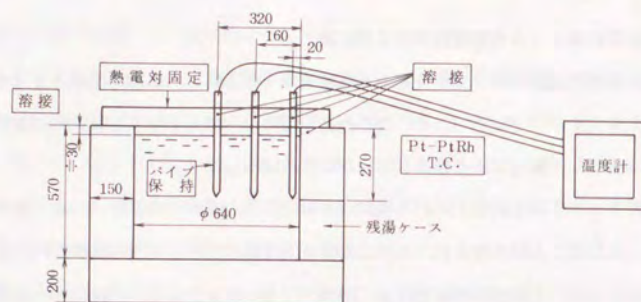


図-2.2.1 基礎試験鑄造要領

表-2.2.1 基礎試験供試材化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P	S	Mg
原料鉄	4.60	0.56	0.62	0.114	0.023	—
吹酸処理後	3.85	0.06	0.36	0.041	0.017	—
Mg 処理後	3.81	2.02	0.37	0.055	0.006	—
取鍋分析	3.81	2.02	0.37	0.055	0.006	0.053
成品分析						
表面	3.69	2.44	0.37	0.054	0.011	0.042
中間	3.60	2.45	0.37	0.051	0.011	0.038
中心	3.48	2.46	0.37	0.051	0.014	0.038

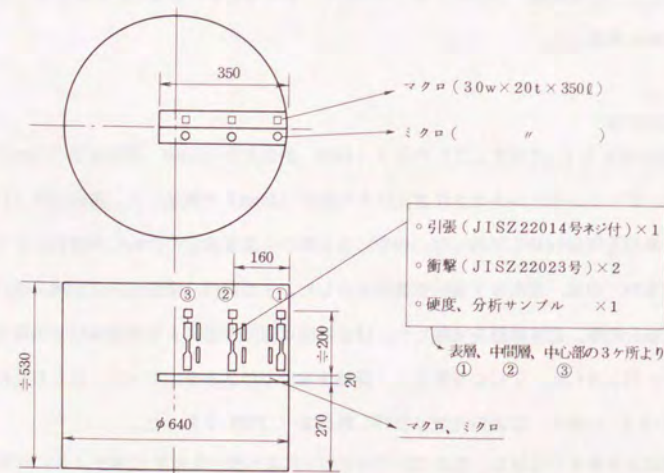


図-2.2.2 基礎試験 試験片採取要領

2.3 試験結果

(1) 機械的性質

表-2.3.1に実体から採取した試験片の機械的性質を示すが、表面から中心にかけて凝固時間がある一定値を越えると急激に伸び、絞り、衝撃値が低下することがわかる。これらの値は西独の基準は満足しているが、我々の目標値(1.8節)は満していない。

表-2.3.1 基礎試験機械試験結果

	Yp (0.2%耐力)	T. S.	Yp/T. S.	E l	RA	切断 箇所	衝撃値	硬度
① 表層	30.1	44.6	0.67	23.8	19.6	A	1.71kgm/cm ²	H _B 149
② 中間層	31.2	47.4	0.66	11.6	8.4	B	0.69	H _B 163
③ 中心部	30.4	47.8	0.64	12.6	9.8	B	0.68	H _B 165

(2) 金属組織

図-2.3.1, 図-2.3.2に供試材の顕微鏡組織を示す。

表面はフェライト組織であるが、表面から50mm以上中心部までフェライト+パーライト組織となっている。黒鉛は中心部にいくにつれて径が大きくなっているが、そのサイズはたかだか直径 100μ程度である。また表面から 200mm以上のところでは共晶凝固時の結晶粒界らしい個所に細粒黒鉛が認められた。球状化は全体的に良好であった。

(3) 凝固組織

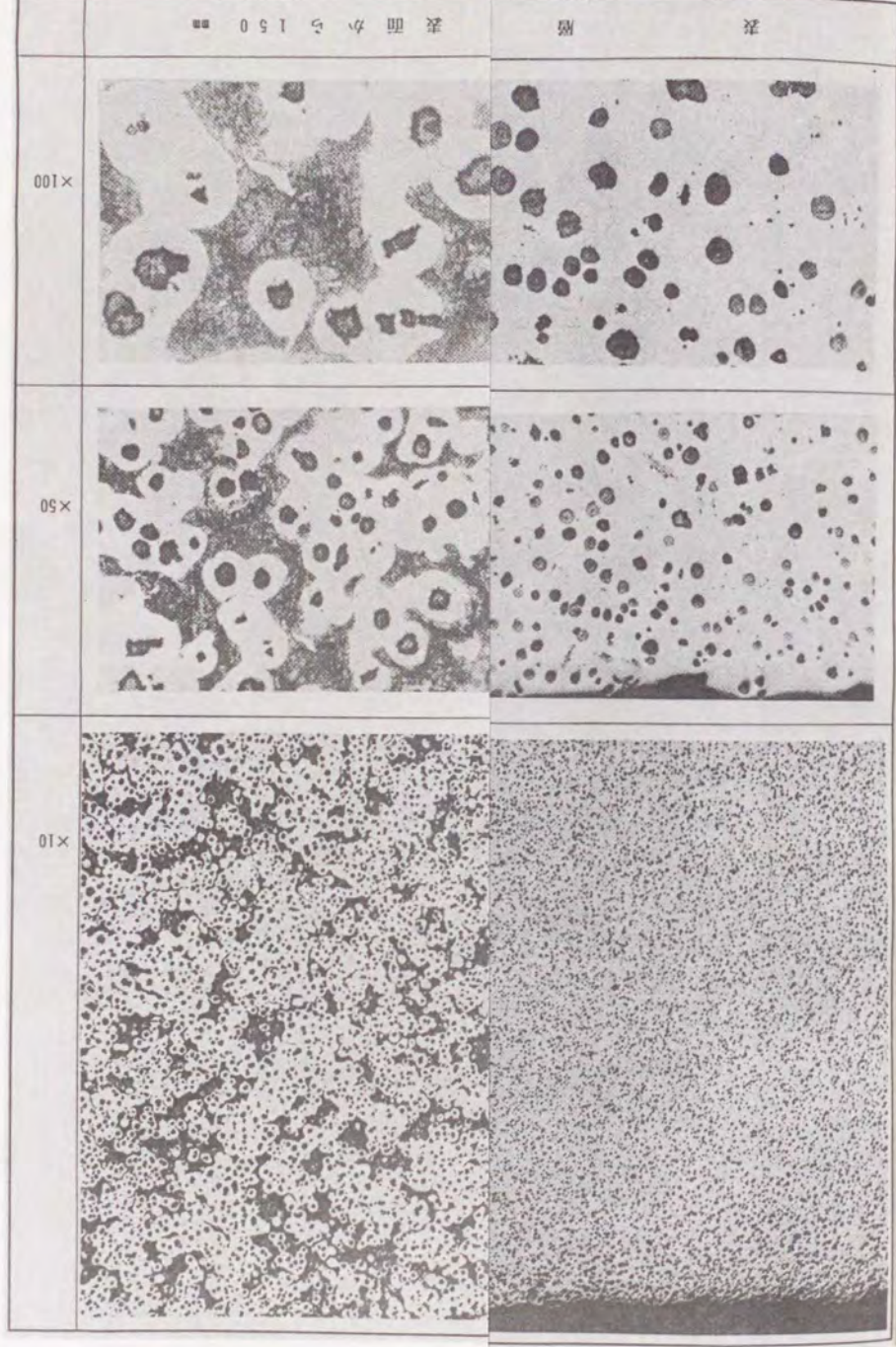
マクロエッチング結果を図-2.3.3に示すが、やはり中心部近傍は凝固時間の遅れから凝固組織がかなり粗くなっており、また表面から30mm位まではフェライト、それ以降はフェライト+パーライトとなっていることがわかる。

(4) 温度測定

温度測定結果を図-2.3.4に示す。中心部については鑄込後約50分で断線したため中心部の全冷却曲線は採取できなかった。表面においては金型による高冷却能のため明確な共晶停滞は認められなかったが、中間および中心では明確な共晶温度停滞が確認できた。

(1150℃)

中間での凝固時間は鑄込後80分であり、このうち10分は溶湯温度が鑄込温度から共晶凝固に達するまでの時間であり70分が共晶凝固に要した時間である。凝固完了後の冷却速度は中間で 2.3℃/分程度である。



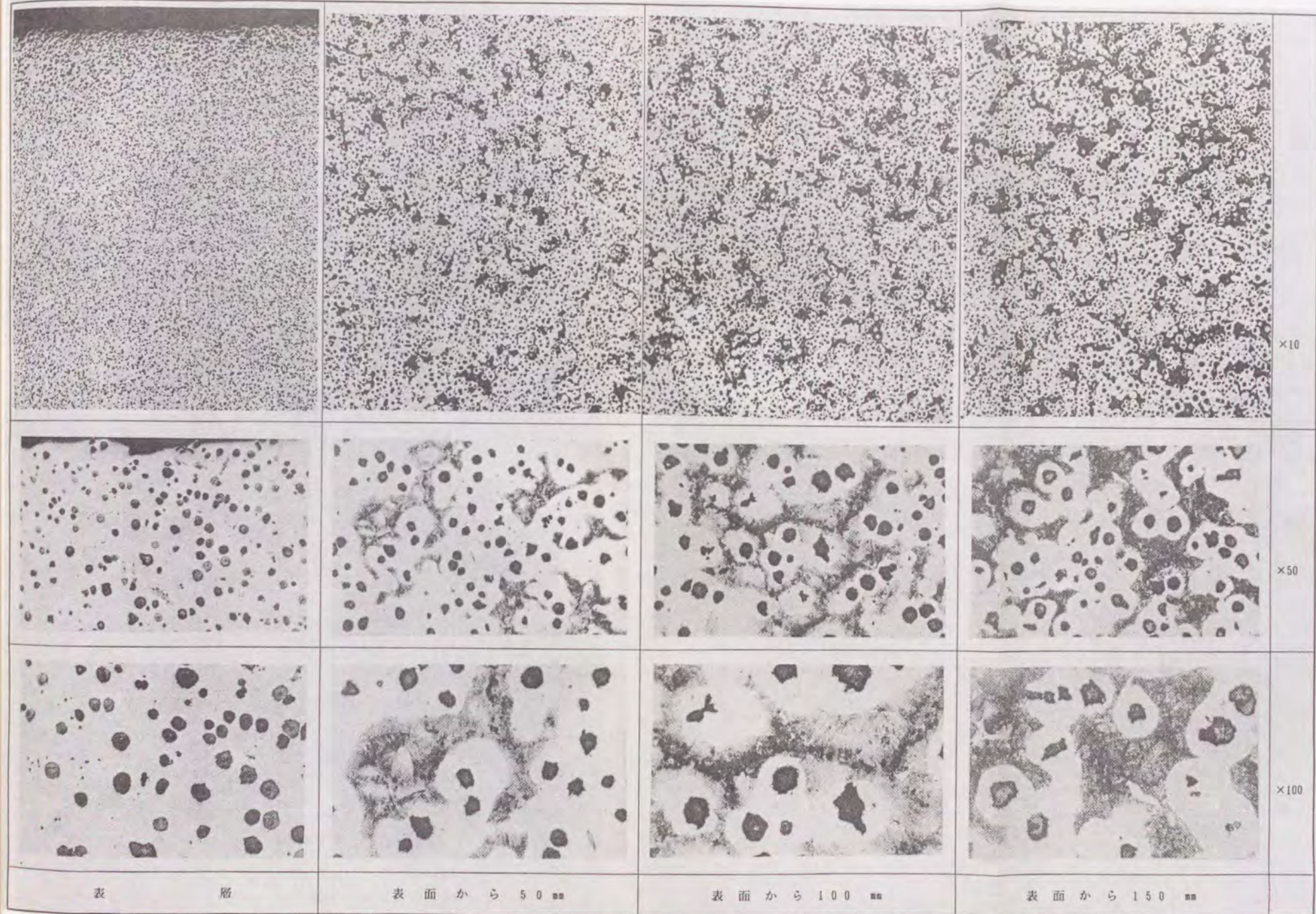
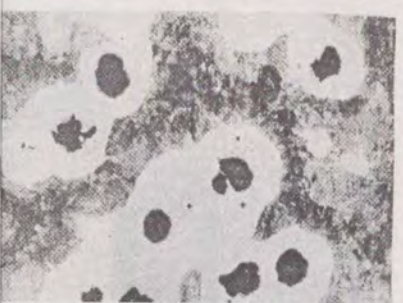
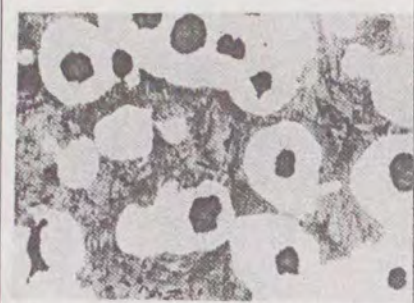


図-2.3.1 基礎試験顕微鏡 組織 (その1)

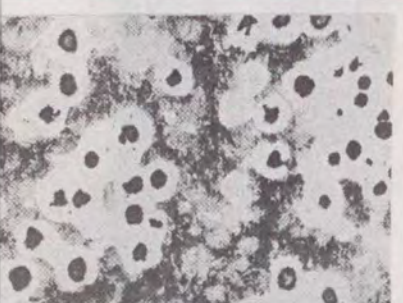
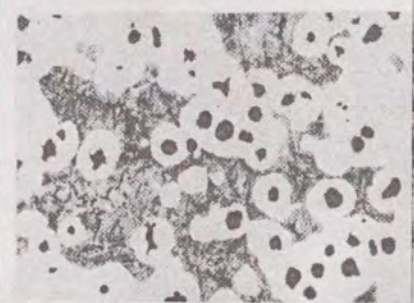
表面から320 μ (中心部)

表面から200 μ

×100



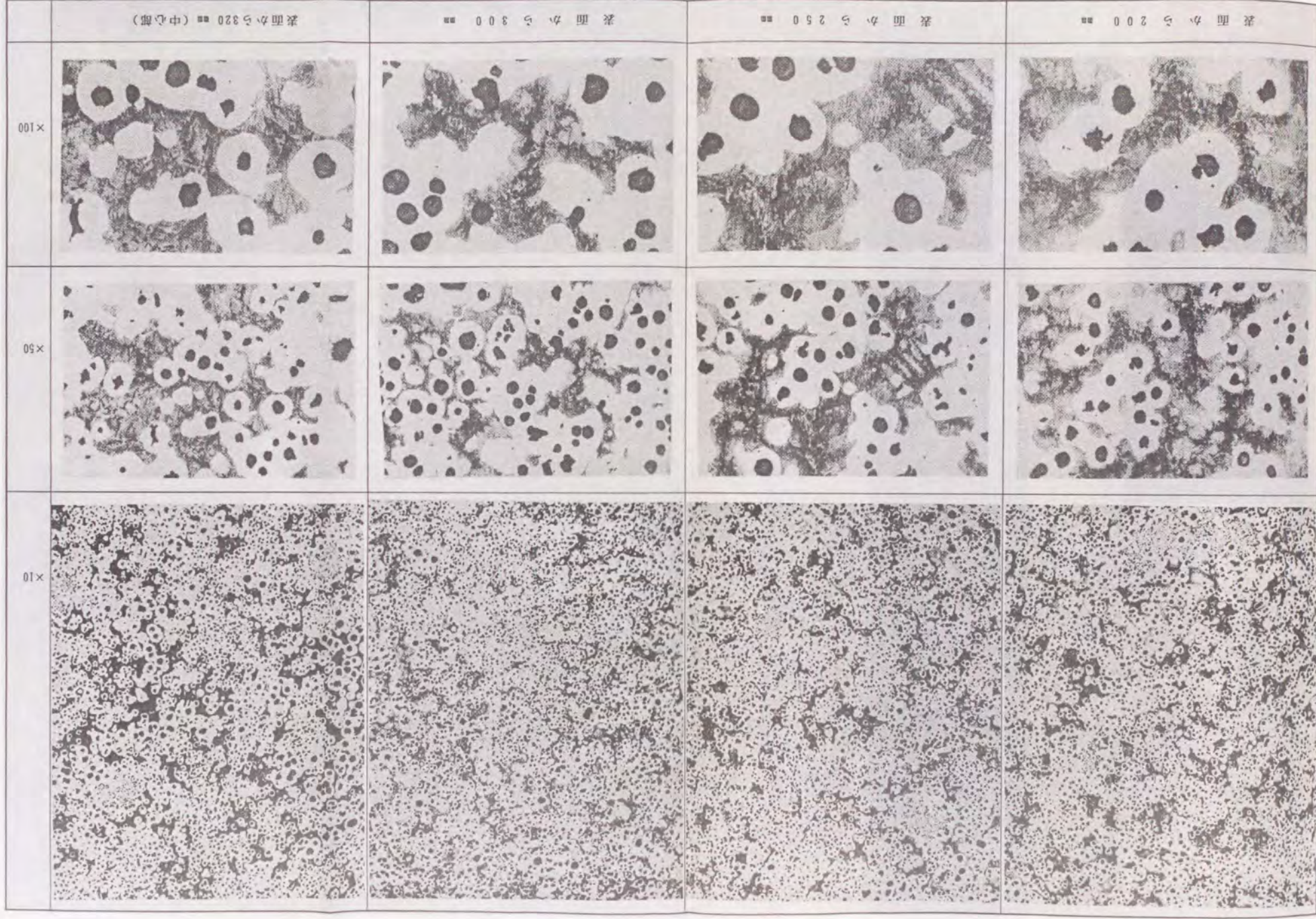
×50

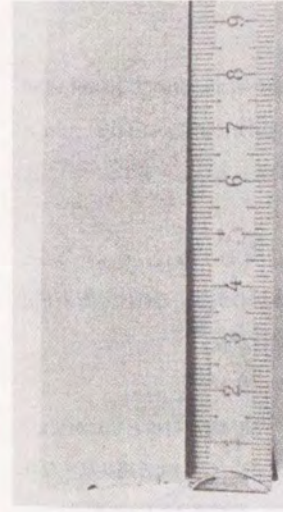


×10



図-2.3.2 基礎試験頭微鏡 組織 (その2)





表層

中心部

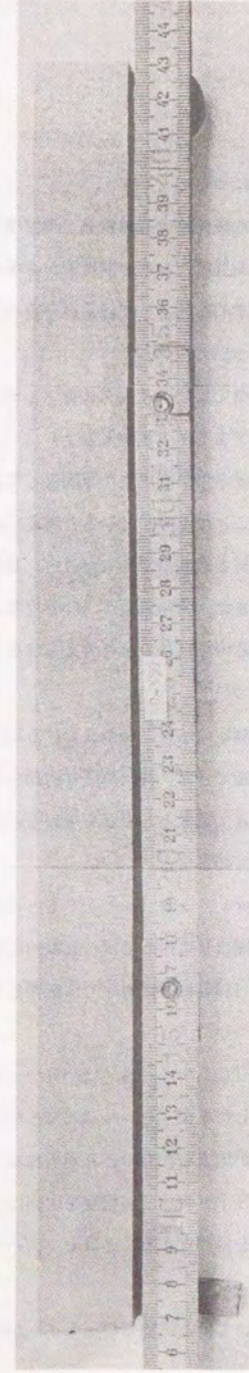


図-2.3.3 マクロエッチング結果

2.4 考 察

(1) 機械的性質について

今回選択した成分系は通常鋳造工場で使用している FCD45材のものを使用した。このため全体的に高強度となり中間位置から中心にかけて伸び値が目標を下まわる結果となった。この金属学的原因としては①パーライト相の析出、②細粒黒鉛の晶出が考えられる。

(2) 金属組織について

西独での実績ではマトリックスをフェライトとしており、パーライト相の析出は認められていない（フェライト率90%以上）。

今回パーライト相が析出した原因としては凝固速度に比して〔Mn〕量が0.37%とやや高目であったことに起因していると考えられる。細粒黒鉛の晶出については化学成分が炭素当量 $\approx 4.4\%$ と過共晶であったこと、凝固時間が長かったこと等に起因しているものと考えられる。また、黒鉛粒径が 150μ 程度と比較的大きいのも過共晶成分系であったことにも一因があるのではないかと考えられる。

(3) 凝固時間について

今回の温度測定の結果、金型における球状黒鉛鋳鉄の表面から30mmおよび160mm位置の凝固時間が測定できた。30mm位置で約10分、160mm位置で約80分であり、 $t(\text{sec}) = \alpha \times \sqrt{R(\text{mm})}$ α : 定数として α を求めるとそれぞれ $\alpha_{30} = 110$, $\alpha_{160} = 379$, $\alpha_{160}/\alpha_{30} = 3.45$ となる。

同様に $t(\text{sec}) = \alpha R(\text{mm})$ とすると $\alpha_{30} = 20$, $\alpha_{160} = 30$, $\alpha_{160}/\alpha_{30} = 1.5$ となり、凝固時間はRに対してほぼ直線的に変化していることがわかる。これは上面・下面からの放熱が160mm位置に対しては影響しているものと推定される。

(4) 化学成分について

本試験では〔C〕 $\approx 3.5\%$, 〔Si〕 $\approx 2.5\%$, 〔Mn〕 $\approx 0.4\%$ を目標としたが〔C〕が高目に推移した結果〔C〕 $\approx 3.6\%$ となり $〔C〕 + \frac{1}{3}〔Si〕 \approx 4.4\%$ と過共晶となり、粗大球状黒鉛が生成したものと考えられる。このため〔Si〕目標値は2.1%程度とし

$〔C〕 + \frac{1}{3}〔Si〕 \approx 4.2\%$ 程度を次回は目標とするのがよいと考えられる。また、これ以上亜共晶側を目標とすることはセンターラインシュリンケージ発生の危険があるので好ましくない。

〔Mn〕については本試験でパーライトが残留したことから、さらに低〔Mn〕側即ち

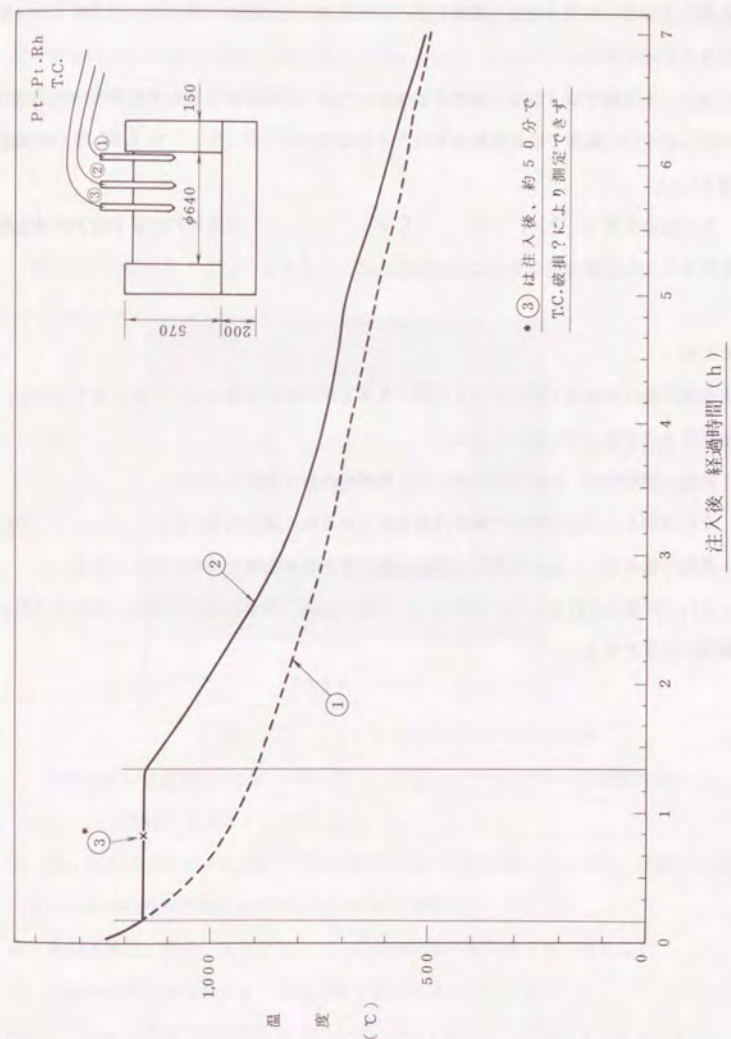


図-2.3.4 温度測定結果

[Mn] ≒ 0.25 %を目標とするのが好ましい。

[Mg] は本試験結果で約 0.040%が残留したが、黒鉛の球状化もほぼ十分であるかことから少なくとも 0.040%を確保するという意味から次回は [Mg] ≒ 0.065%を目標とするのが好ましい。

また、本試験では [Ni] は使用しなかったが、衝撃値が不十分であるため次回は他の要因に害のない範囲で低温衝撃値を向上させるため若干 ([Ni] ≒ 0.40 %) の添加が望ましい。

その他の元素 ([P], [S], [Cr], [Cu]) は機械的性質を低下させる原因となることから極力低くすることにしたい。

2.5 まとめ

本基礎試験は実铸造工場での製造技術の水準を求め開発課題を抽出することであるが、その結果をまとめると次のようになる。

- ① 現状（昭和60年）水準では目標とする機械的性質は達成できない。
- ② その原因としては対象物が極厚肉铸造体であるため凝固時間が長く、パーライトの析出、黒鉛の粗大化、一次晶粒界への微細黒鉛の晶出等が起きたためと考えられる。
- ③ これらの防止を計るためには②Mn含有量の低減、③凝固速度の増大、④炭素当量の低減等が必要である。

3. 実肉厚・1/2スケールモデル铸造試験

3.1 目的

前章で述べた基礎試験を原点として 1.8節の材料基準を満たすための材料設計を行ない、材料製造技術の信頼性を確認すると共に、次ステップで実施するフルスケールモデル铸造試験における課題を抽出することを目的として実物大の肉厚を持ち高さが 1/2 である底付円筒を铸造した。

3.2 供試体

供試体の形状は以下に述べる考え方に従い、図-3.2.1 のものを選定した。

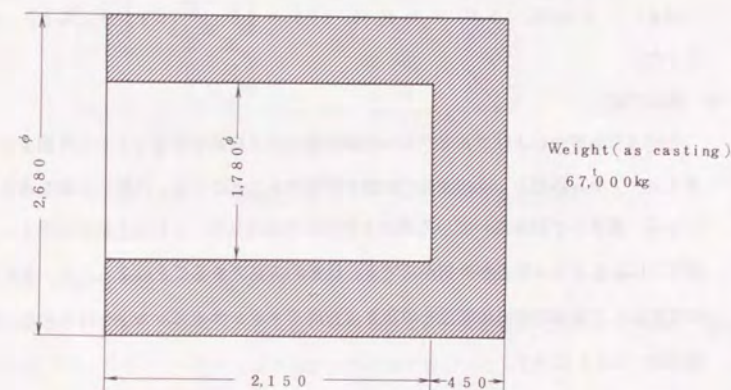


図-3.2.1 1/2サイズモデル供試体形状

- (1) 日本における使用済燃料の一時貯蔵（5年間プール内冷却後一定期間貯蔵する。）の際に、十分な遮蔽効果を持っていること。
- (2) 既に実用化されている西独の使用済燃料容器に比較的類似しており、日本での実用化の場合に機械的性質が最も得られにくい形状を模擬していること。
- (3) 黒鉛球状化、浮上、粗大化等について十分模擬できるサイズであること。
- (4) 比較的容易に铸造ができ、機械試験片等が十分に採取できること。

以上の理由から西独で実用化されている Castor V型の径・肉厚はそのままとして、高さのみ約 1/2 としたモデルを供試体とした。

参 考

キャスク種類	基準肉厚 (mm)	燃料冷却期間
Castor 型	450	5 年
TN型	380	5 年
米国方式	200	10年

3.3 製造条件の選定

(1) 化学成分

2.4 節での検討結果から $[C] \approx 3.5\%$, $[Si] \approx 2.1\%$, $[Mn] \approx 0.25\%$, $[Mg] \approx 0.065\%$, $[Ni] \approx 0.40\%$, $[P] \cdot [S] \cdot [Cr] \cdot [Cu] : \text{as low}$ とした。

(2) 鑄造方法

今回は材料確性およびフルモデルへの課題抽出が主目的であることから外側金型・内側ダイレクトチル砂型とし冷却速度の影響を把握することにした。内側に砂型を適用したことから、筆者らが日常用いている底部上型方式を採用した。これは上型面は広くなるが機械加工によるドロス除去が外側からでき、比較的容易であることによる。又、各部の冷却速度を変えて機械的性質の変化を確認する目的でチラーサイズに大小を持たせた。鑄造方案を図-3.3.1 に示す。

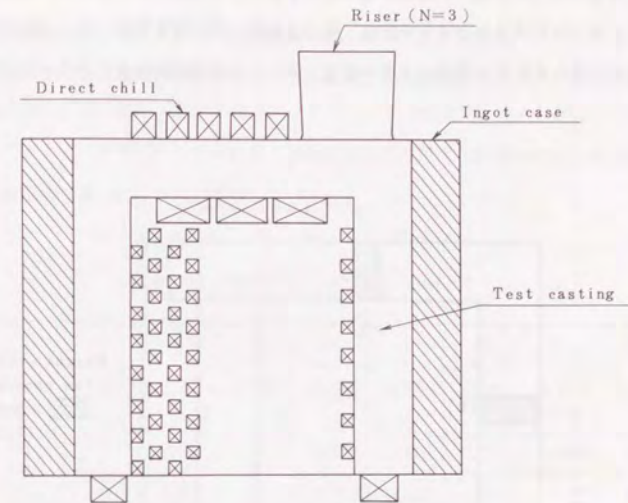


図-3.3.1 実肉厚・1/2スケールモデル鑄造方案

(3) 溶解・球状化处理

鑄造量が約70TON と多量であることから塩基性エルー式電弧炉で主原料を溶解し、置きつき法（サンドウィッチ法）により球状化を実施することにした。

(4) フェライト化熱処理

球状黒鉛鑄鉄は鑄造後の冷却速度を遅くすることにより熱処理を実施しないでフェライト化する方法もあるが、鑄造場所（ビット）の回転、金型類の回転から、量産化時を想定した場合には鑄造後の冷却速度を早くして回転をよくした方が経済的であるため、鑄放しでは残留パーライトが析出するが、これを熱処理によりフェライト化することにした。またこの工程を持つことにより、各種機械的性質への対応が容易となる。

3.4 調査項目および調査方法

図-3.4.1 に供試体からのサンプルの切出し部位を示すが、使用済燃料輸送・貯蔵容器の試験条件（輸送規則）から考えて、最も条件的に厳しくなる胴部中央を代表するB部を重点

的に調査することとし、単に設計基準から必要となる項目のみではなく、他の製品の参考となるようにクリープラプチャー試験、疲労試験等についても実施した。試験方法は、JISの規定に従いそれぞれの試験条件で実施した。なお破壊靱性試験については別途詳述する。

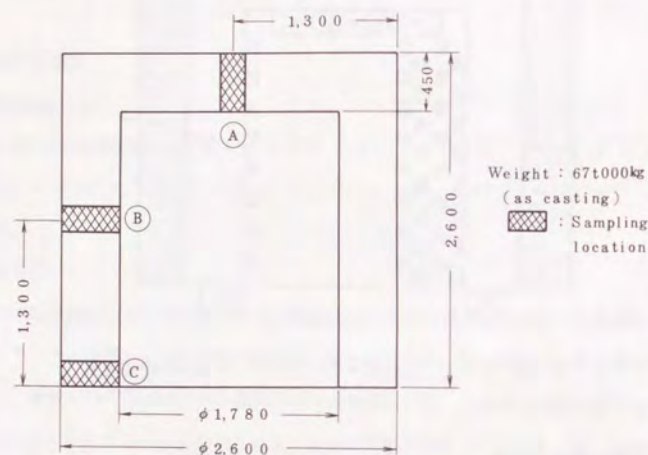


図-3.4.1 試料採取位置

3.5 調査結果

(1) 化学成分

表-3.5.1 に化学成分の実績および分布を示す。

A 部には黒鉛の浮上に伴うと考えられる〔C〕の濃度が若干認められるが、その他の元素は高さ方向、肉厚方向ともにほぼ均一と考えてよく、また〔Mg〕の肉厚中心部における減少もほとんど認められなかった。

(2) 金属組織

図-3.5.1 にマクロ組織、図-3.5.2 にサルファプリント結果を示すが、鑄造欠陥や偏析は全く認められなかった。

図-3.5.2 にB部のミクロ組織を示す。外表面は直径50 μ 程度の黒鉛が晶出しているが、凝固時間が長くなる（最終凝固位置に近づく）につれ黒鉛径が大きくなり3/4 tの位置では直径120 μ 程度のものまで晶出している。また共晶セル境界と見られる部位には軽微ではあるが糸くず状の黒鉛が認められる。マトリックスはほぼフェライトとなっているが局部的にパーライトの残留が認められる。黒鉛の球状化は粗大化にもかかわらずほぼ完全であり黒鉛粒数は粗大化につれて低減している。

表-3.5.1 化学分析結果

Chemical composition of test Casting

Section		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mg
A	Outer Surface	3.85	2.15	0.23	0.016	0.006	0.39	0.033	0.013	0.075
	1/4 t	"	2.09	"	0.022	0.004	0.39	0.034	"	0.072
	2/4 t	"	2.12	"	0.015	0.005	"	"	"	0.066
	3/4 t	"	2.11	"	0.017	0.003	"	"	"	0.070
	Inner Surface	"	2.10	"	"	0.004	"	0.035	"	0.075
B	Outer Surface	3.70	2.13	0.24	0.026	0.003	0.40	0.037	0.011	0.072
	1/4 t	3.70	2.15	"	0.020	0.004	"	"	"	0.070
	2/4 t	"	2.14	"	0.024	"	"	0.036	"	0.071
	3/4 t	"	2.16	"	"	"	"	"	"	0.067
	Inner Surface	"	2.13	"	"	"	"	"	"	0.072
C	Outer Surface	3.65	2.11	"	0.024	"	0.39	"	"	0.072
	1/4 t	"	"	"	"	"	"	0.034	"	"
	2/4 t	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	3/4 t	"	2.12	"	0.026	"	"	"	"	"
	Inner Surface	"	2.11	"	0.023	"	"	0.035	"	0.071

t : thickness (t = 450mm)

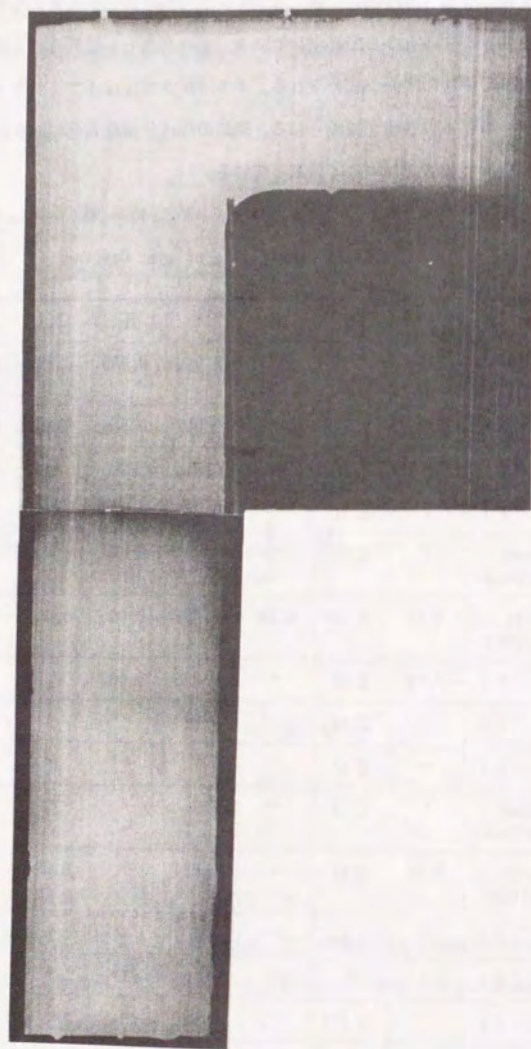


図-3.5.1 試験材の縦断面マクロ組織
Macro-structure of cross section of test casting

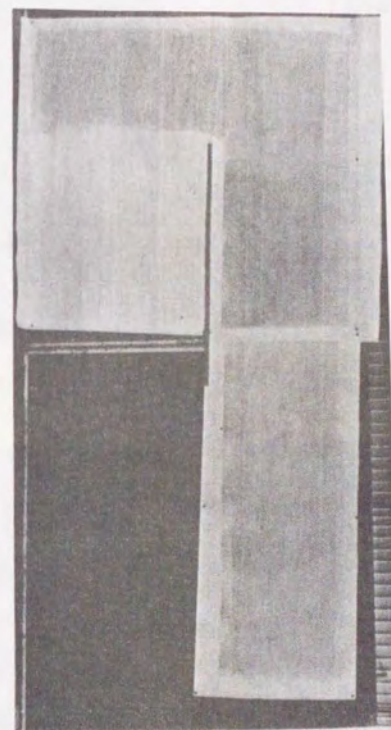
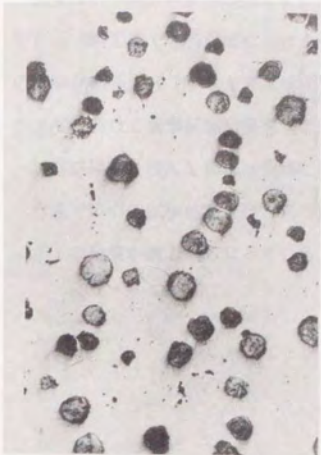
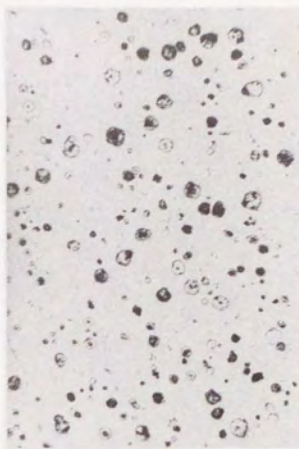
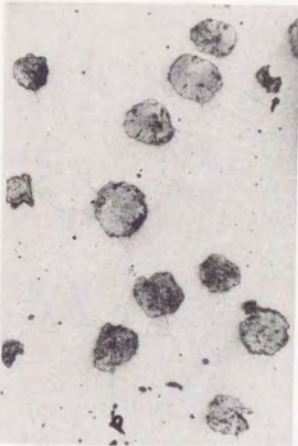
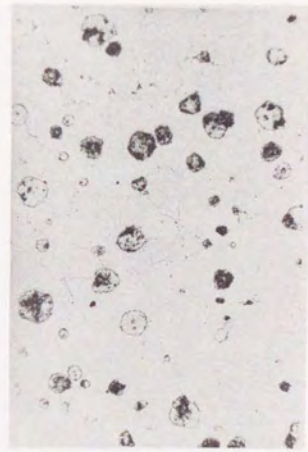


図3.5.2 試験材の縦断面のサルファープリント
Sulphur print of cross section of test casting

Inner Surface	Outer Surface	
		X 50
		X 100

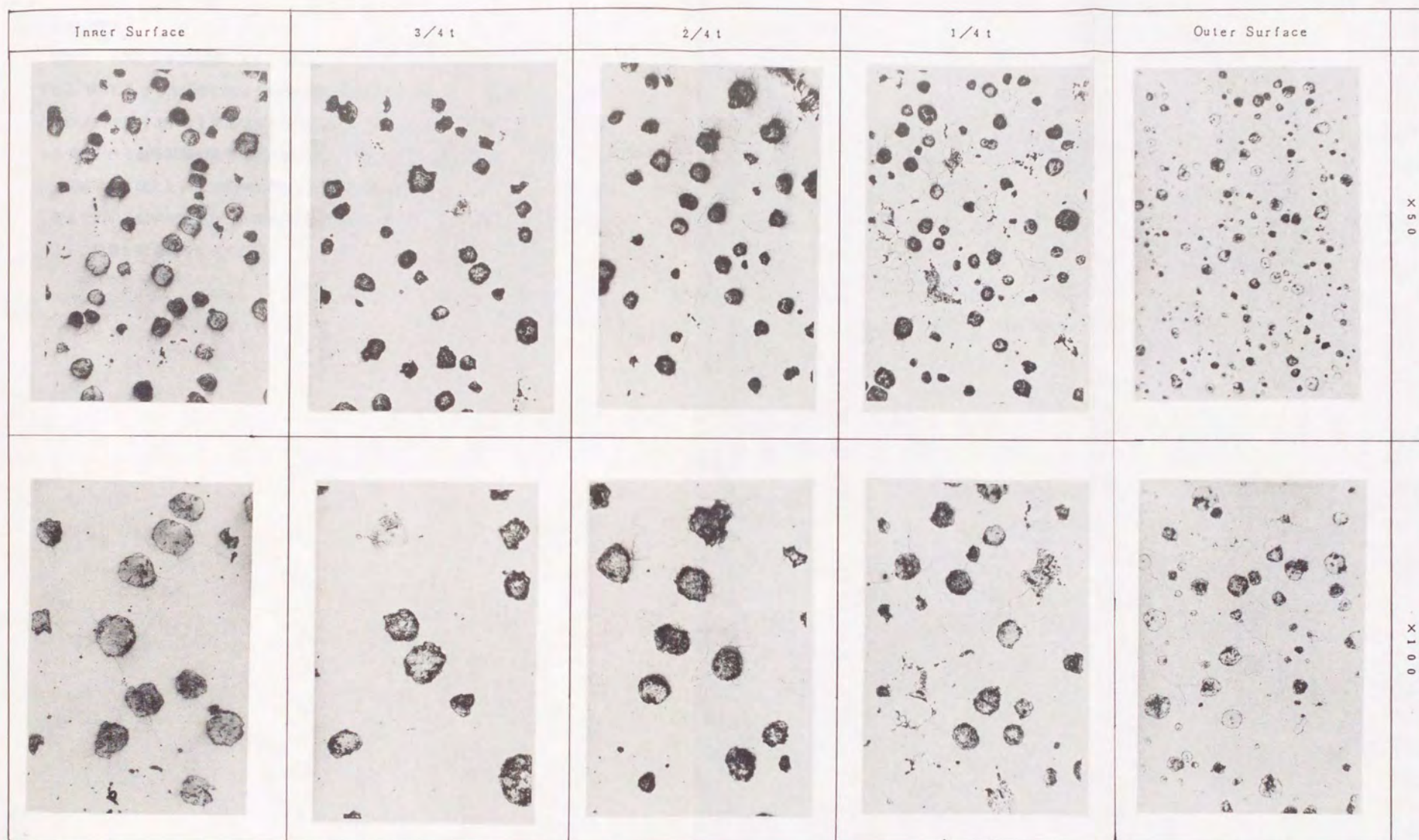


図3.5.3 顕微鏡組織B部

Microstructure of B section. t : Thickness ($t=450\text{mm}$)

(3) 機械的性質

図3.5.4～図3.5.6及び図3.5.7，図3.5.8に室温での引張試験結果を図3.5.9に -40°C から 600°C までの各温度における引張試験結果を示す。図3.5.10に室温における各部位の衝撃試験結果（JIS4号試験片）を図3.5.11，B部における -40°C から 600°C までの各温度における衝撃試験結果を示す。また図3.5.12にはB部の中央部のクリープラプチャー試験結果を，図3.5.13には同様に回転曲げ疲労試験結果を示す。

室温での引張試験結果ではB部の値が0.2%耐力，抗張力，伸びともに低く，中でも3/4tの位置が最も低くなっている。

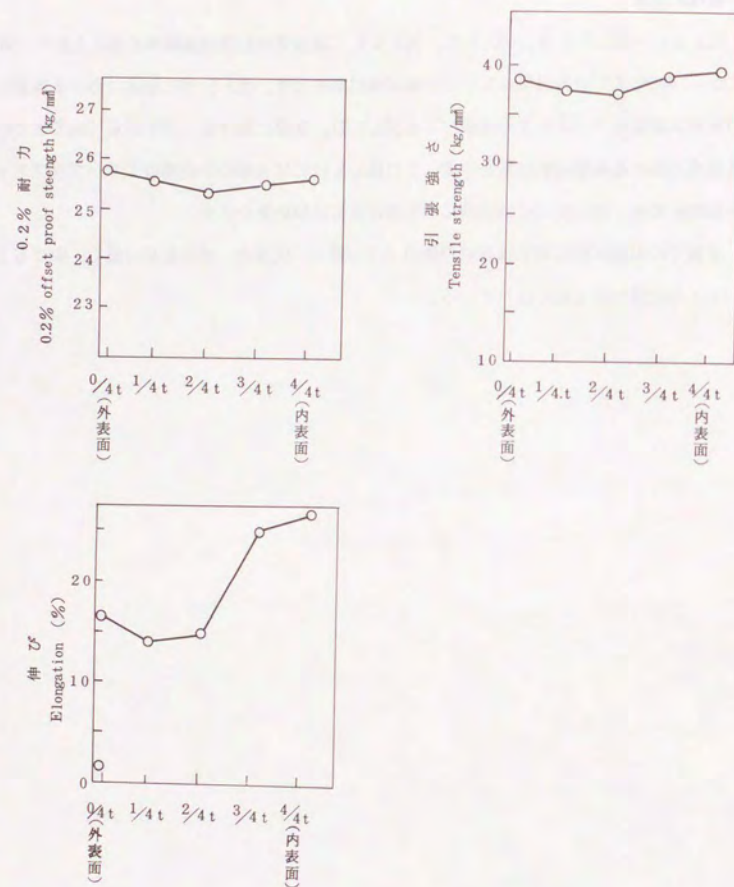


図-3.5.4 A部の引張り試験結果

Results of mechanical properties from section A of test casting

t : Thickness (t = 450mm)

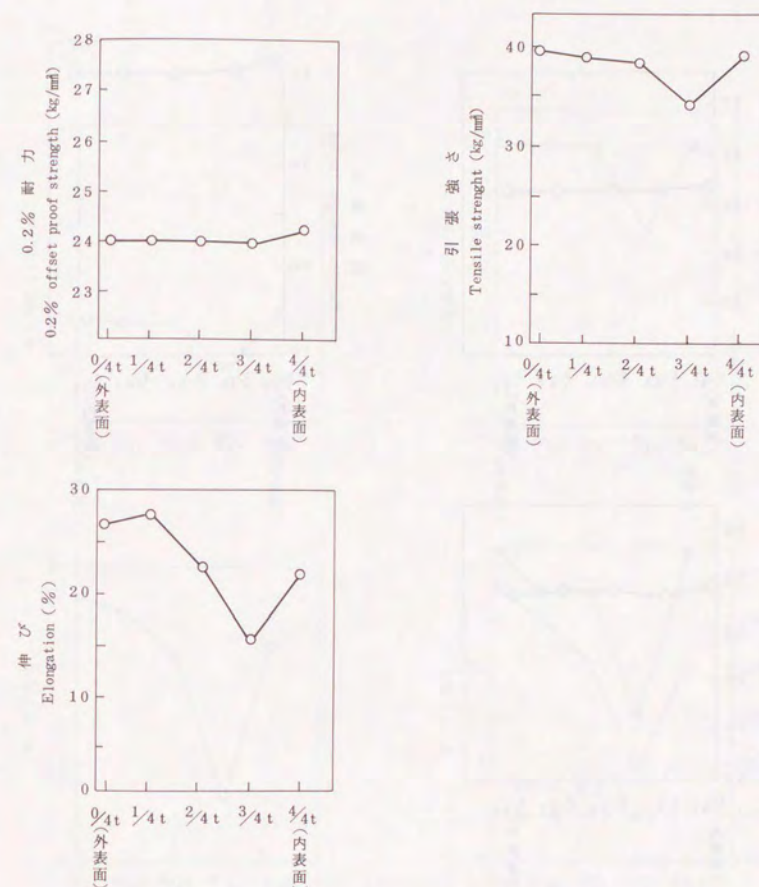


図-3.5.5 B部の引張り試験結果

Results of mechanical properties from section B of test casting

t : Thickness (t = 450mm)

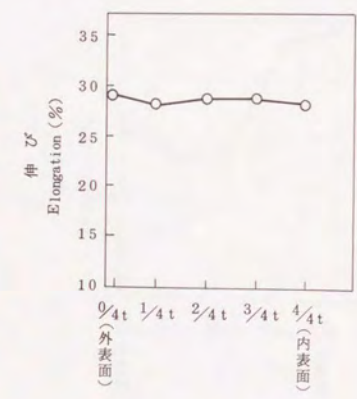
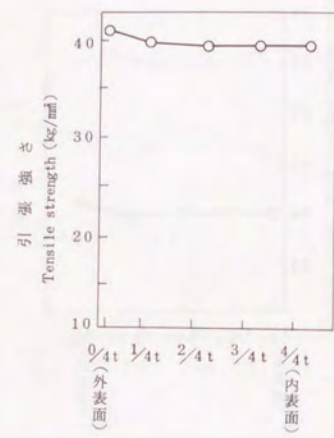
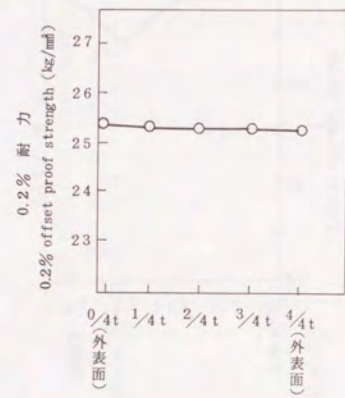


図-3.5.6 C部の引張り試験結果

Results of mechanical properties from section C of test casting

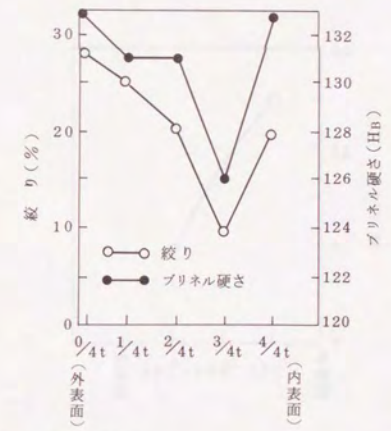
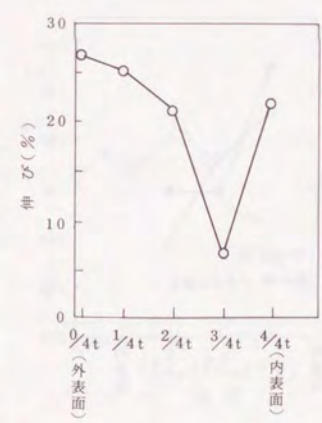
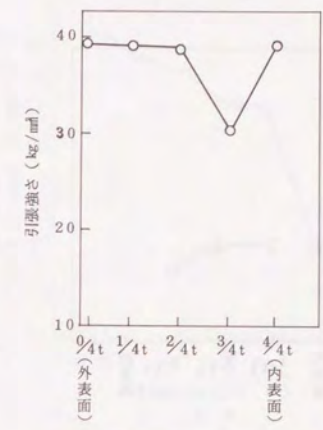
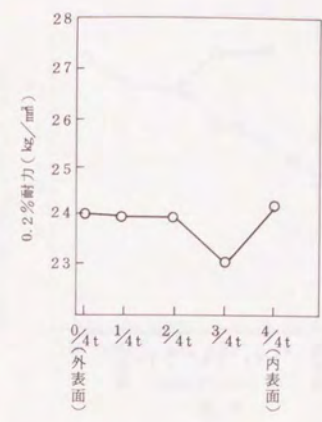


図-3.5.7 B部の周方向の引張り試験結果

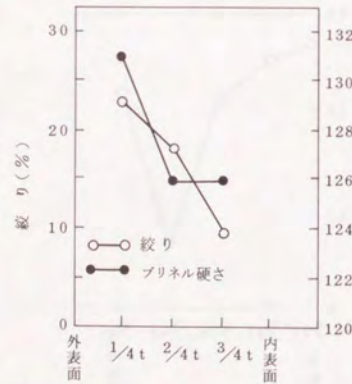
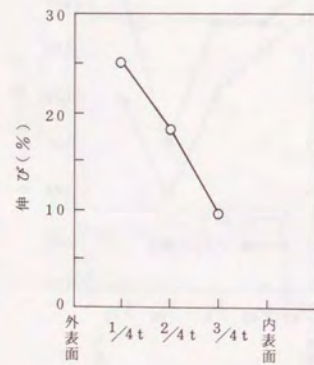
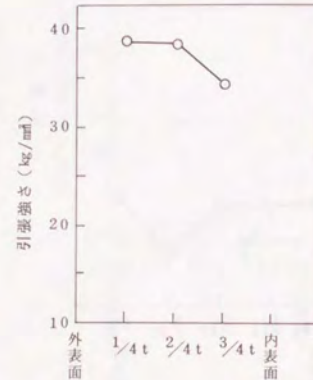
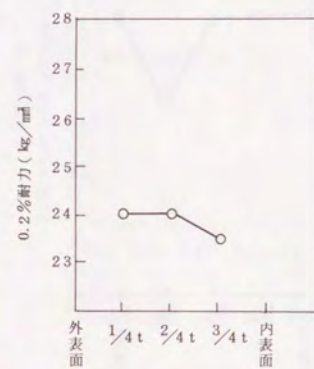


図-3.5.8 B部の径方向の引張り試験結果

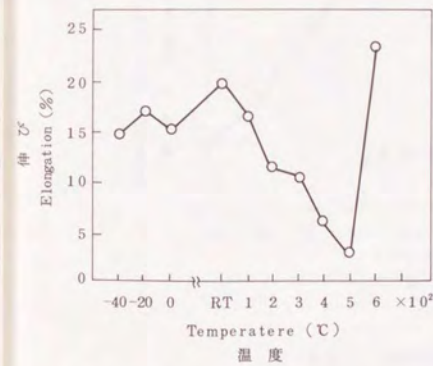
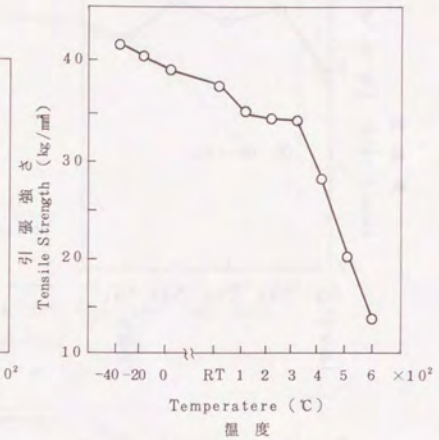
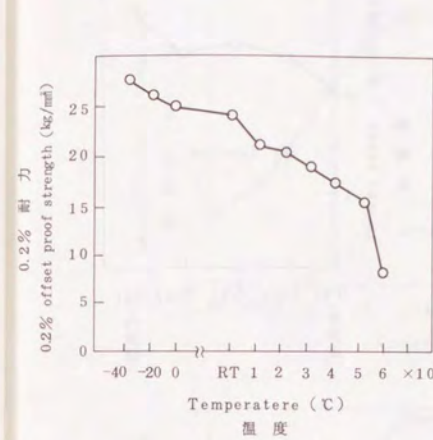


図-3.5.9 B部の2/4 tの低・高温引張り試験結果

Relation between temperature and mechanical properties from B section of test casting.

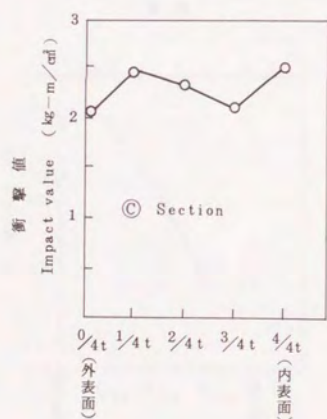
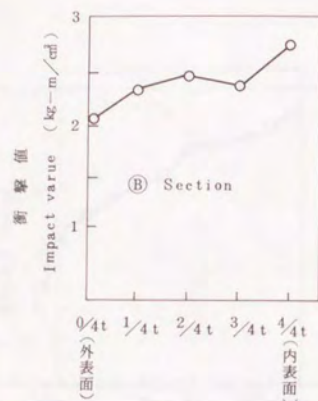
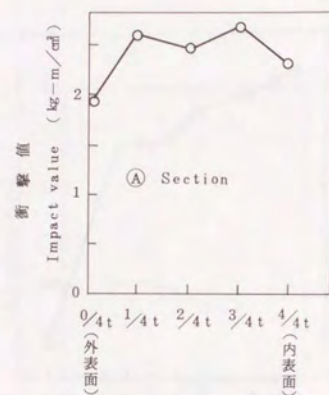


図-3.5.10 試験材の衝撃値 (kg-m/cm²) (常温)
Results of impact value for test casting (room temp.)
(t : Thickness)

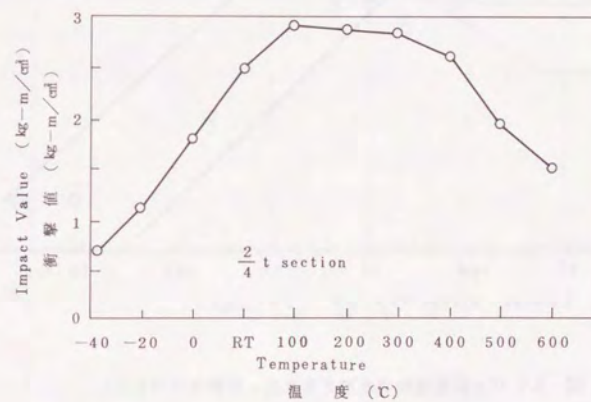
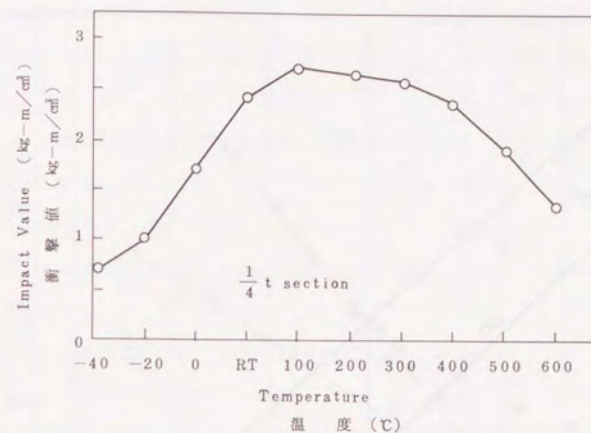


図-3.5.11 試験材の衝撃値と温度の関係
Relation between temperature and impact value from B section of test casting

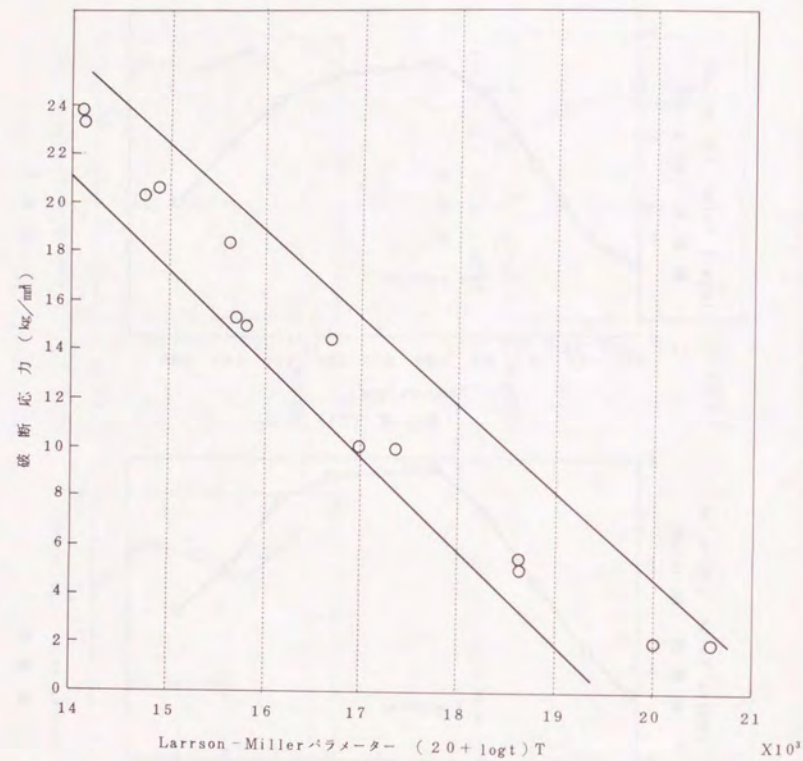


図-3.5.12 試験材のクリープ破断試験結果 (B部)

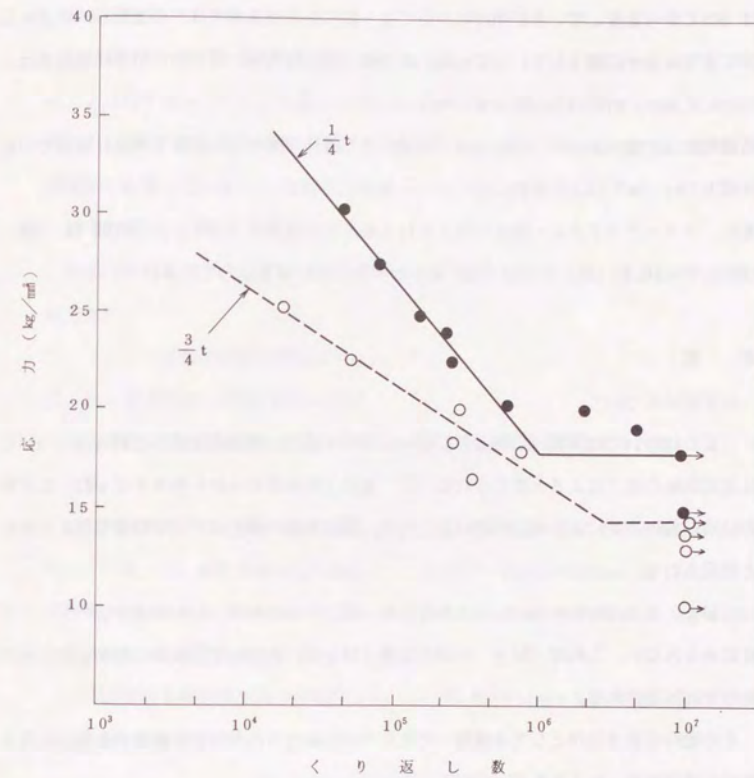


図-3.5.13 試験材B部の疲労試験結果

各温度での引張試験では 0.2%耐力は 500℃で、抗張力は 400℃で急に低下しており、伸びは 600℃から急変しているが伸びについては-40℃から室温まではやや上昇し、室温から 500℃までは徐々に低下していている。また軸方向、径方向、周方向の引張試験結果はよく一致しており、材料の方向性は見られない。

衝撃特性は上部シェルフ 2.5kg-m/cm²強であり遷移温度は 0℃程度である。室温での疲労強度も 15kg/mm² 以上と鋳鋼に近いレベルを示している。

また、クリープラプチャー強度も考えられる最高使用温度の 400℃、10万時間 (L, M, パラメータ $\approx 16.8 \times 10^3$) で 10kg/mm² 以上と非常に高い値を示している。

3.6 考 察

(1) 化学成分について

〔C〕についてはB部、C部とも3.65~3.70%とほぼ目標値を達成したがA部については晶出黒鉛の浮上によると推定される〔C〕量の上昇が認められ3.85%となった。この原因は冷却能の不足により凝固時間が長くなり、晶出黒鉛の浮上に十分な時間を与えたためと推定される。

〔Mg〕は 0.066%~0.075%とかなり均一なレベルであり、いわゆるフェーディングは認められない。これは〔Mg〕がほぼ全量〔MgO〕となって溶鉄中に分布したためであろうと推定される。

その他の元素は全体としてほぼ均一であり今回の鑄造方法が均質な鑄造品を製造する上でほぼ適切であったことを示している。

(2) 金属組織について

サルファブリント、マクロエッチングともに視認できる欠陥や偏析は存在しなかった。特に鋳鋼品と比較して逆V偏析や中心凝固収縮孔が存在しないのが球状黒鉛鋳鉄の特徴であり、この理由から球状黒鉛鋳鉄が構造用部材として優れていることを示している。

球状化も 3/4 t 位置でも 90%以上となっており、また黒鉛粒数、黒鉛粒径も 25コ/mm²、70μとほぼ所定のレベルに納まっている。しかしながら共晶セル境界と思われる部位に糸くず状の黒鉛が認められる。この原因としては凝固末期の濃化溶液部の不純物レベルが高くなったためと推定され、一層の高純度化又は高冷却能化が望ましい。

焼鈍処理後のパーライトの析出は認められず〔Mn〕量低減の効果があったものと考え

られる。

(3) 機械的性質について

1.8 節で述べた材料基準の目標値 ($\delta_B \geq 32 \text{ kgf/mm}^2$, $\delta_{V0.2} \geq 20 \text{ kgf/mm}^2$, $\epsilon \geq 12\%$) と比較すると 3/4 t 位置での伸びが一部で 8~9%と下回っている。この結果は前橋らの結果¹⁰⁾ とよく一致しており、凝固時の冷却能の不足が原因であり前述の糸くず状黒鉛が影響しているものと考えられる。

(4) 鑄造方案について

今回は外側金型、内側ダイレクトチル砂型で試作を行なったが、次のような問題点が提起できた。

① 3/4 t 部の伸び値が目標を下まわった。

② 糸くず状黒鉛の晶出が認められた。

そこで 1250℃~1150℃における平均冷却速さと伸びの値を整理すると図-3.6.1 のようになる。

ここで、平均冷却速度は有限要素法プログラム MARK-II で 2 次元回転対称モデルを用いて行なった。凝固潜熱は液相線温度 (1,210℃) から固相線温度 (1,140℃) に対して比熱を均一に分散させる操作を行なって修正した。表 3.6.1 ~ 表 3.6.2 に本計算に用いた境界条件および物性値を示す。

この結果から伸び 12%以上を確保するためには 0.8℃/min 以上の冷却速度が必要であることがわかった。

表 3.6.1 凝固計算の境界条件

初 期 温 度	鋳 鉄	1,250℃
	鋳 物 砂	50℃
	冷 金	50℃
バ ル ク 温 度		30℃
熱 伝 達 率	鋳 物 - 冷 金	0.029
	鋳 物 砂 - 大 気	0.001
	冷 金 - 鋳 物 砂	∞ (1,000,000)

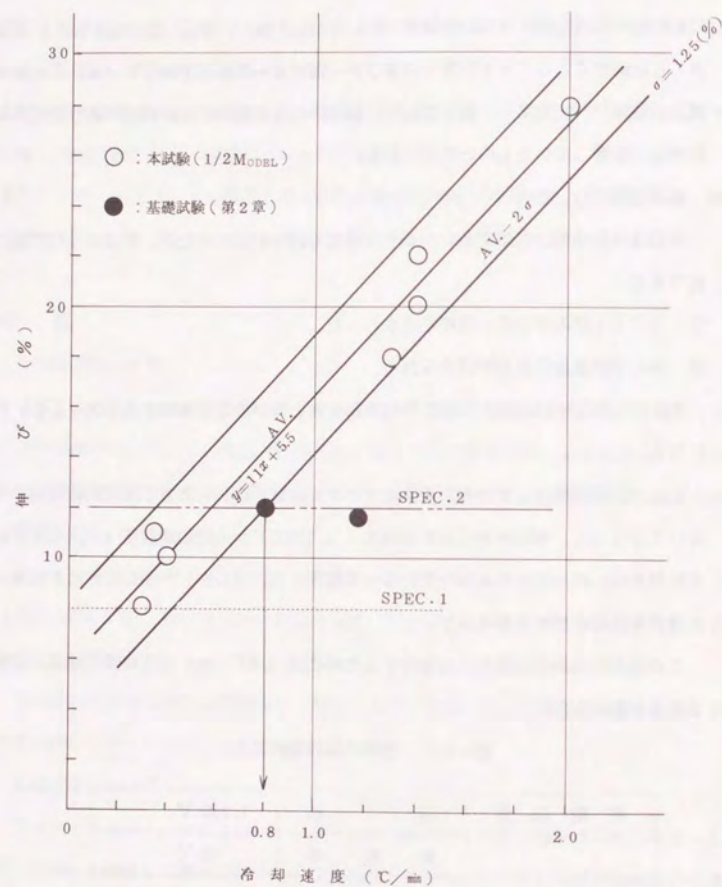


図3.6.1 CASK-1/2 MODELにおける伸び値に及ぼす冷却速度の関係

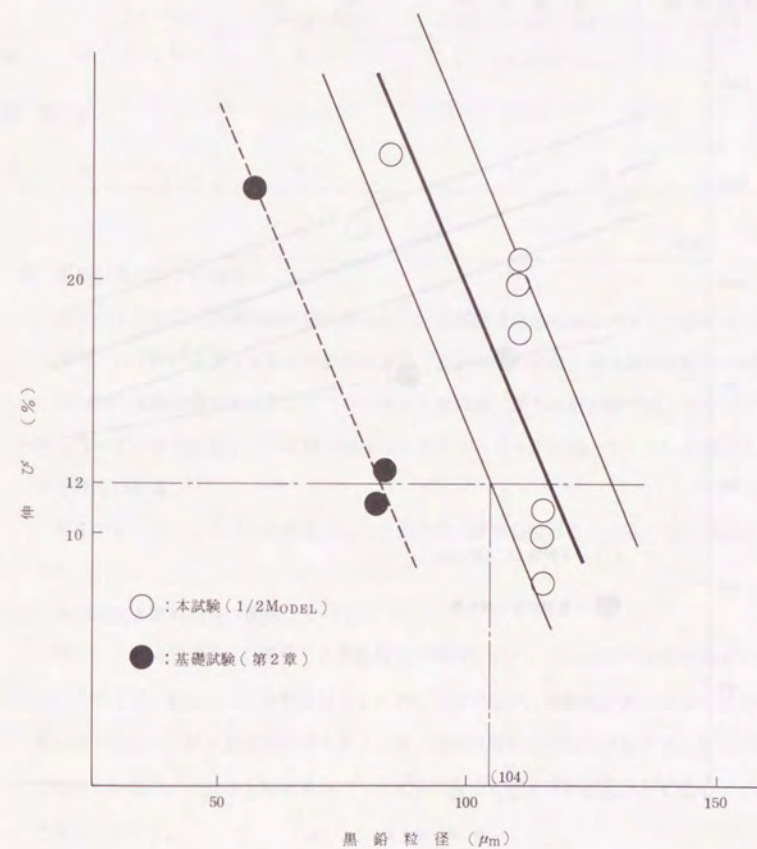


図3.6.2 黒鉛粒径と伸びの関係

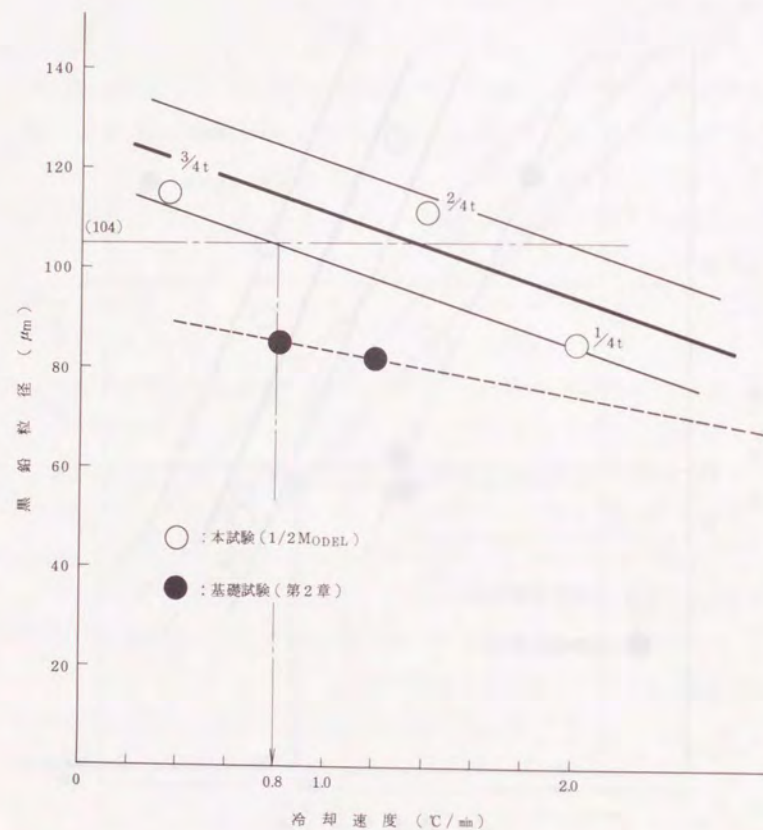


図3.6.3 球状黒鉛鋳鉄の冷却速度と黒鉛粒径の関係

表3.6.2 凝固計算に用いた物性値

	(g/cm^3)	比 熱 ($\text{cal}/\text{g} \cdot \text{deg}$)	熱 伝 導 率 ($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{deg}$)	凝固潜熱 (cal/g)
鋳 鉄	7.1	0.17	0.08	50
鋳 物 砂	1.5	0.23	0.003	—
冷 金	7.2	0.17	0.08	—

(5) 黒鉛粒径と伸びの関係について

図3.6.2に伸びと黒鉛粒径の関係を示した。本試験と基礎試験にバイアスがかかってはいるが、いずれの場合にも黒鉛粒径が大きくなると伸びが少なくなる傾向が認められる。

本試験と基礎試験の差は主としてパーライト量の差、即ち基礎試験では、ブルズアイ組織となっているのに対し、本試験ではほぼ完全なフェライト組織となっている事によるものと考えられる。

そこでオールフェライトを前提として目標とすべき黒鉛粒径を求めると104 μm 以下となる。

(6) 冷却速度と黒鉛粒径の関係について

図3.6.3に冷却速度（計算値）と黒鉛粒径の関係を示す。冷却速度が非常に大きい場合（例えば5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）には黒鉛粒径は50 μm 位に収束するが、比較的小さい場合には冷却速度が遅くなるにつれて黒鉛粒径は大きくなる。基礎試験が本試験と比較すると粒径が小さくなっているが、これは含有炭素がパーライトに費やされたため黒鉛としては小さくなったものとする。

そこで、パーライトがほとんどない状態を考えて、前項で検討した黒鉛粒径104 μm とすると冷却速度としては0.8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ となり、(4)項での検討結果と一致する。

3.7 まとめ

今回の試験から以下のことがわかった。

- (1) 目標とする機械的性質を達成するには $0.8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ($1250^{\circ}\text{C}\sim 1150^{\circ}\text{C}$) 以上の冷却速度と不純物元素の低減が必要である。
- (2) 肉厚 450mm 以上の球状黒鉛鑄鉄は構造用部材として十分使用できる。
- (3) 球状黒鉛鑄鉄は鋼と比較すると極めて均質で機械的性質の方向性は認められない。

4. 球状黒鉛鑄鉄製キャスク・フルスケールモデル鑄造試験

4.1 緒言

原子力発電所の使用済み燃料は、原子炉建屋内の水プールで貯蔵され、一部は国内で、大部分は英仏両国に輸送されて、再処理を行なっている。しかし、原子力発電比率の上昇による使用済み燃料の増加にともない、再処理を行なうまで一時的に貯蔵する中間貯蔵・輸送兼用容器（以下、キャスクとする）の必要性が高まってきている。キャスク用材料として、西独で球状黒鉛鑄鉄が使用され始めていることから、日本でも球状黒鉛鑄鉄の適用が検討されている。ところが、キャスクは大型で極厚肉のため、凝固時間の増大にともなうマグネシウムのフェーディングや黒鉛の粗大化等による材質劣化の問題が考えられ、第2章、第3章で厚肉部実体の調査として、 $\phi 640\text{ mm}$ 円柱および実肉厚 $\cdot \frac{1}{2}$ 高さモデルの鑄造・確性試験を実施し、 $0.8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以上の冷却速度を確保すれば、マグネシウムのフェーディングや黒鉛粒の粗大化が防止でき、所定の機械的性質が得られることを示した。

そこで今回は、想定される最大級キャスク素材を製造し、球状黒鉛鑄鉄キャスクの製造技術の確立を行なうとともに、その材料の確性調査を実施した。即ち、キャスク素材の想定される最大肉厚部に対して、引け果防止のための成分設計、鑄造方案の検討、球状化率および適正黒鉛粒径を確保するため冷却条件の決定等を行なった。

4.2 試験方法

4.2.1 製造条件

確性調査を行なうために製造したキャスクの形状および製造条件を表4.2.1に示す。化学成分の 3.6% [C]、2.1% [Si] を目標に配合したのち、塩基性アーク炉で溶解・精錬した。

4.2.2 調査方法

鑄造されたキャスクについては、型出し後フェライト化焼鈍を行ったのち、以下の試験を行なった。

(i) マクロ組織

キャスクを縦断面に切断したのち、10%硝酸アルコール腐蝕液でマクロ腐蝕組織の観察を行なった。

(ii) 化学分析及びマイクロ調査

キャスクの1/2高さ(上部より2,650mm)の部位から、肉厚方向に4等分した位置で試料採取し、マイクロ組織観察(ナイトール腐蝕)、化学分析を調査した。

(iii) 機械的性質

キャスクの高さ方向を1,000mm間隔で切断したのち、肉厚方向を4等分(外表面、1/4t、2/4t、3/4t、内表面、t:厚さ)した部位から、JIS4号引張試験片を採取し、常温で調査した。また、1/2高さから同様にJIS4号衝撃試験片、JIS4号引張試験片、引張クリープ試験片、引張クリープ破断試験片を採取し、衝撃試験(-80℃~200℃)、高速引張試験(ひずみ速度0.4~3,600min⁻¹)、低・高温引張試験(-50℃~200℃)、クリープ破断強度について調査した。

表4.2.1 キャスクの製造条件

鋳造形状	
溶解炉	50t塩基性アーク炉, 100t塩基性アーク炉
原材料	釜石高純度, ダクタイル鉄, 鋼くず
球状化処理剤	Fe-Si-Mg
接種剤	Fe-Si
鋳型	外面: 金型, 内面: 冷し金
熱処理	900℃—炉冷+680℃—炉冷

4.3 調査結果

4.3.1 内部性状

キャスク縦断面のmacro腐食組織を図1に示す。図4.3.1から明らかなように、内部欠陥は全く認められない。表2は、キャスク中央部の化学成分について示す。表4.3.1の結果によると、凝固時間の遅延によるマグネシウムのフェーディングはきわめて少ない。



図4.3.1 フルモデルキャスクのマクロ組織

縮尺 $\frac{1}{50}$

表4.3.1 キャスクの化学成分(%)

部位	肉厚	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mg
注入流	—	3.60	2.01	0.27	0.025	0.004	0.78	0.030	0.065
1—高さ部 2	外表面	3.54	2.02	0.28	0.018	0.007	0.81	0.024	0.058
	1/4t	3.56	2.05	0.28	0.019	0.006	0.82	0.024	0.057
	2/4t	3.48	2.06	0.28	0.017	0.005	0.82	0.024	0.058
	2/4t	3.56	2.04	0.28	0.019	0.006	0.81	0.024	0.060
	内表面	3.56	2.05	0.28	0.024	0.007	0.81	0.024	0.059

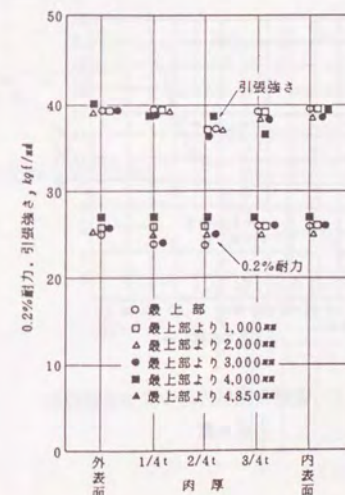


図4.3.2 肉厚方向による0.2%耐力、引張強さの変化

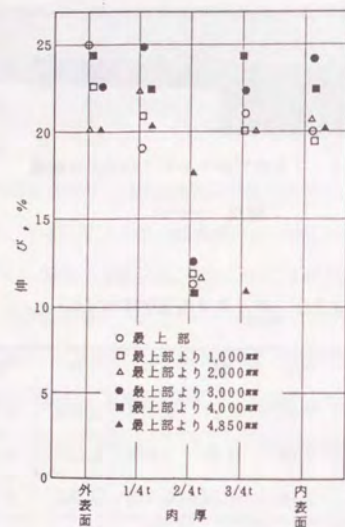


図4.3.3 肉厚方向による伸びの変化

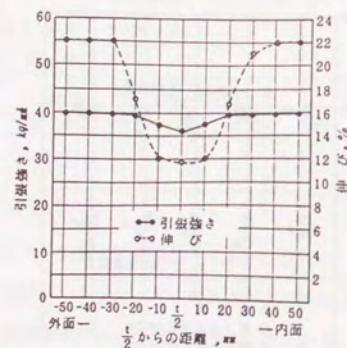


図4.3.4 最終凝固部付近の引張試験結果
 $\frac{1}{2}$ 高さ部

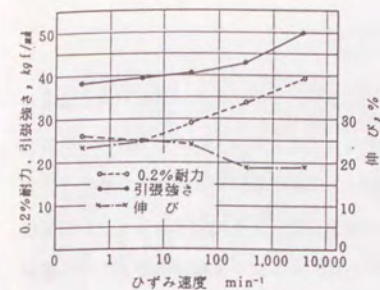


図4.3.5 高速引張試験結果 $\frac{1}{2}$ 高さ部 1/4 t

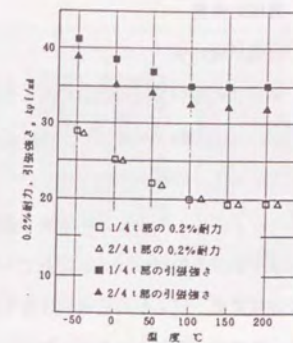


図4.3.6 キャスク材の低・高温強度 $\frac{1}{2}$ 高さ部

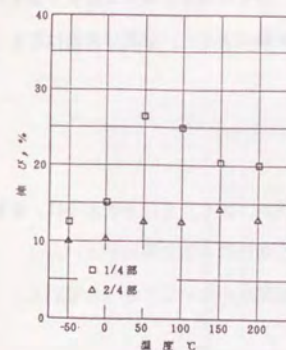


図4.3.7
キャスク材の低・高温における伸びの変化
 $\frac{1}{2}$ 高さ部

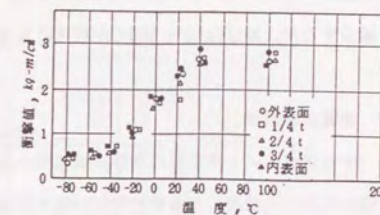


図4.3.8 キャスクの衝撃特性と温度との関係
 $\frac{1}{2}$ 高さ部

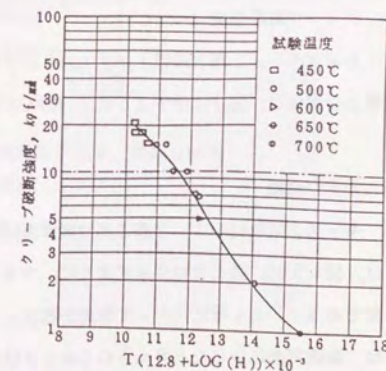


図4.3.9 クリープ破断強度とLarson-Miller パラ
メーターとの関係—高さ部
 $\frac{1}{2}$

4.3.2 機械的性質

(1) 引張試験結果

キャスクの引張試験結果を図4.3.2, 図4.3.3に示す。この図より, 強度, 伸びは高さ方向による変動は小さいが, 最終凝固部に相当する2/4 t部(上部より4,850mmの部位は3/4 t)の伸びが低下している。この脆(ぜい)弱部の範囲を調査するため, 1/2高さの2/4 t周辺を10mm間隔で調査した。この結果, 図4.3.4に示すようにぜい弱部は肉厚中心部の約40~50mmの範囲で存在している。次に, キャスクは輸送中の落下や貯蔵中の地盤変動, 何らかの破壊的作用等の事故を考慮すると, ひずみ速度が異なる場合の強度や, 貯蔵時に予想される低・高温(-40℃~200℃)における強度の調査が必要である。このため, 高速引張試験(通常のひずみ速度は0.5min⁻¹)及び低・高温引張試験を行なった。これを図4.3.5~図4.3.7に示す。図4.3.5より, ひずみ速度を増大させると強度が増加し, 伸びが低下する傾向にある。また, 高・低温試験によると, 強度は高温になると減少するが, 伸びは50~100℃が最大になる。

(2) 衝撃試験結果

キャスク1/2高さ部の衝撃試験結果と温度との関係は, 図4.3.8に示すように, 衝撃値は常温から低温になるにしたがい低下するが, 肉厚の部位による差異は小さい。

これは, 今回の組織の範囲では黒鉛形状や粒数との相関が小さいことを示している。

(3) クリープ破断強度

キャスク1/2高さ部の1/4 t, 2/4 t部のクリープ破断強度と Larson-Miller指数との関係は, 図9に示すように, 400℃で10⁵hの破断強度は約8 kg/mm²である。

4.3.3 ミクロ組織

キャスク試験材の1/2高さ部の肉厚方向のミクロ組織および画像処理により解析結果は, 図4.3.10, 図4.3.11に示すように, マトリックスはフェライト組織を示し, 最終凝固部である1/2 t部に向かって黒鉛が粗大になり, 粒数も少なくなる。また1/2 t部では, 凝固界面に生じたと考えられる糸くず状の黒鉛が晶出している。

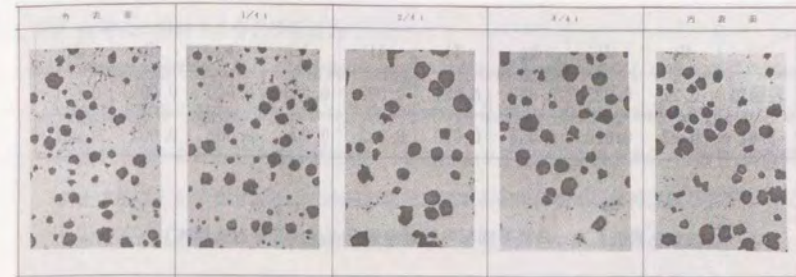


図4.3.10 キャスクのミクロ組織 $\times 50 \times 2/5$, $1/2$ 高さ部

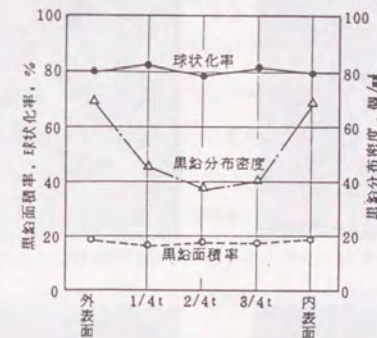


図4.3.11 キャスク試験材の球状化率, 黒鉛面積率及び黒鉛分布密度 $1/2$ 高さ部

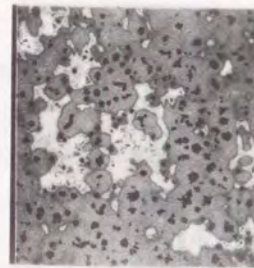
表4.4.1 表層部最終凝固部の成分変動（化学分析）

	Mn	P	Mg	Ti	Al	V	As	Sb	Zr
表層部	0.27	0.025	0.058	0.021	0.022	0.004	0.003	0.002	0.001
2/4t	0.27	0.020	0.054	0.020	0.023	0.004	0.003	0.002	0.001

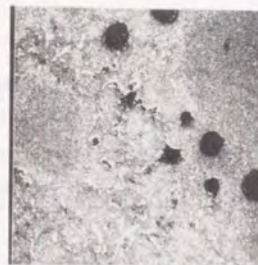
表4.4.2 最終凝固部の元素の偏析状況（EPMA調査）

Si	Mn	P	S	Ni	Mg	Sb	Bi	V	Ti	Al
×	○	○	△	×	○	△	△	○	△	○

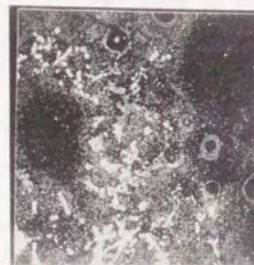
○ 偏析大, △ 偏析小, × 負偏析



a. マンガン



b. リン



c. マグネシウム



d. チタニウム

図4.4.1 糸くず状黒鉛部のEPMA結果

4.4 考 察

4.4.1 化学成分制御による引け巣防止

鋳物は、凝固時に生じる体積変化のため、適正な鋳造方案を採用しなければ、内部に鋳造欠陥（鋳巣）が生じる。しかし、球状黒鉛鋳鉄は凝固時に収縮と同時に黒鉛晶出による膨張が生じることから、適切な化学成分を選定すると収縮と膨張が相殺され、内部欠陥を防止することが可能である。これらの研究に関する報告は多く¹⁾、押湯無し方案として技術が確立されている²⁾。球状黒鉛鋳鉄製キャスクも、内部欠陥の防止が不可欠であり、また、同一肉厚による円柱や角柱の長尺となるため、押湯による給湯距離が不十分となり、内部欠陥を確実に防止するためにも、鋳巣の生じない成分系を選定することが品質管理からも有利である。その成分系としては、けい素含有量を1.8~2.3%、炭素当量（%C + 1/3%Si）を4.3%の供晶付近になるように炭素含有量を設定すれば、鋳造欠陥を生じないキャスクの製造が可能である。このように、鋳物の信頼性の面からの最大の課題である内部欠陥の防止が、球状黒鉛鋳鉄の場合、化学成分で管理できるため、キャスクの信頼性の向上にとって、適切な成分を選定することは必須になる。西独では、内部欠陥の許容限は8mmφ以下といわれているが、今回のフルモデル試験材や前回の1/2スケールモデル試験材においても、肉眼および超音波探傷調査で確認できる欠陥は皆無であり、キャスクのマクロ欠陥に関する問題は少ないと考えられる。

4.4.2 冷却速度制御による黒鉛粒徑制御

一般に、球状黒鉛鋳鉄においては、厚肉部の球状黒鉛粒徑の粗大化と球状化率の低下が起こり、その結果として機械的性質が劣化すると考えられてきた。第3章で示したように黒鉛粒徑が冷却速度に依存することから本試験では最大肉厚部の最終凝固と考えられる部位の冷却速度（計算値）を0.8℃/minとするため、内面・外面とも金型を用いることとし、前記冷却速度を確保するため金型厚みを400mmとした。その結果、図4.3.10のマイクロ組織および図4.5.11に示されるごとく、2/4t部、3/4t部で黒鉛粒徑110μm、球状化率80%が達成できた。第3章では黒鉛粒徑110μmで伸び11.8~12.0%であり、第3章の予測が立証できた。

4.4.3 中心部のじん性向上対策

今回のキャスク試験材の唯一の問題点は、最終凝固部に相当する肉厚中心部の40~50mm

範囲のじん性低下である。この原因として、凝固時の共晶セル界面に生じた糸くず状黒鉛の晶出が考えられる。すなわち、糸くず状黒鉛が切欠き性を増大するとともに、粒界の断面積を減少させるためにじん性が低下したものと推定される。この原因を調査するため、正常部と糸くず状黒鉛晶出部の不純元素含有量について、化学分析及びE P M A調査を行った。これを表4.4.1、表4.4.2及び図4.4.1に示す。ここでE P M Aは、定量的に含有量が色別できる装置を用いており、図4.4.1で輝白色の部分が最大の含有量を示す、この値は、平均含有量の5倍以上の値に相当している。これらの結果によると、化学分析では大きな差異が認められないがE P M Aのようなマイクロ分析によると、マンガン、りん、マグネシウム、バナジウム、アルミニウム、アンチモン等が、マトリックスの5倍以上の濃度になっている。以上のことから、糸くず状黒鉛は、最終凝固部の残湯に不純元素が濃縮し、この残湯は凝固時に球状化阻害元素を多量に含有しているために、黒鉛が球状化されず、板状に晶出したものと推定される。以上のことから、キャスクの延性の向上対策には、不純元素含有量を減少させ、粒界偏析を防止することが、大切である。また、キャスクは肉厚が大きいために、凝固時間が長くなる。このため、糸くず状黒鉛の晶出を防止するには、通常考えられている以上に不純元素の含有量を減少させ、粒界の清浄度を向上させることが必要である。このため、原材料に高純度鉄を多く使用するとともに、球状化処理剤や接種剤に不純元素の含有が少ない合金を使用して、粒界偏析を防止すれば、糸くず状黒鉛の晶出を防止でき、延性が向上するものと考えられる。

4.4.4 西独キャスクとの比較

肉厚200mmを越える球状黒鉛鋳鉄の規格は、J I Sに規定されておらず、今後、何らかの規格化が必要となろう。西独にはD I N規格があるが、肉厚が200mmまでで、200mm以上では、ユーザーと別途協議して決定するようになっている。キャスクに関しては、引張強さが $300\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、伸びが8%以上といわれている。今回試験品をこれと比較すると、強度に関しては大幅に上回っており、伸びに関しても、500mmの肉厚で中心部に存在する40~50mmの延性低下部でも10%以上あり、この部を除くと20%程度の延性が確保されていることから、西独で製造されているキャスクと比較しても十分な強じん性を確保していると考えられる。

次に、西独製のキャスクは鑄放し（熱処理なし）で使用されている場合があるといわれている。キャスクの熱処理の必要性に関しては、基本的には要求される材力を満足すればいずれでもよいが、キャスクの材力を満足するためには、マトリックスをフェライトとする必要があり、このためには A_{11} 変態を徐冷する必要がある。したがって、製造設備の熱処理炉やピットの回転を考え、生産性の良い方法を各メーカーで選定すれば良いと考えられる。しかし、キャスクは極厚であり、凝固速度も小さく、最終凝固部は元素の偏析にともないパーライトが生じやすく、粒界に種々の化合物も析出する可能性があることから、品質を安定化するために、これらの化合物をマトリックスに固溶させ、共晶セル界面に生じたパーライトを確実にフェライト化するために、熱処理を施すほうが無難と考えられる。また、生産性から考えても、鑄造工場で長時間かけて徐冷するより、早期に熱処理工場に転送するほうが有利と考えられる。

つぎに、内部欠陥に関する規格でも、西独では8mm以上の欠陥を有しないことになっているが、マクロ組織や全面の超音波探傷試験結果でも欠陥は認められず、この面からも西独製キャスクに比べて遜（そん）色ない。なお、超音波探傷試験では、肉厚の一方からの探傷では6mmφ以上、両面探傷で4mmφ以上の欠陥の検出は可能である。以上のことを考慮すると、西独製キャスクを上回る品質の球状黒鉛鋳鉄製キャスクの製造技術が確立されたと考えられる。今後、J I S等による規格の整備、設計基準の確立、落下試験、実証貯蔵試験等を行ない、キャスクの許認可に努力する必要がある。

4.5. 結 言

原子力発電所の使用済み核燃料を中間貯蔵する容器を開発するため、想定されるフルサイズモデルを製造し、その材料の確性調査を行ない、以下の結果が得られた。

- (1) キャスクの鑄造欠陥は、マクロ組織、超音波探傷試験からも認められなかった。
- (2) 引張試験結果は、高さ方向での差異は小さいが、最終凝固部に40~50mm範囲で延性の低下が認められる。この原因として、最終凝固部に不純物元素が濃縮され、一部が糸くず状に晶出したためと推定される。これは、原材料の選定で軽減されるものと考えられる。
- (3) 衝撃値は全体的に均一であるが、常温から-20度に遷移点がある。
- (4) ミクロ組織は、黒鉛球状化率が80%以上あり、良好である。
- (5) 化学成分は、各元素とも大きな変動もなく、凝固の遅延によるマグネシウムのフェーディングも少ない。
- (6) 冷却速度を制御することにより黒鉛粒径は制御可能である。
- (7) 試験材の材力は、西独で実用化されているキャスクの規準を上回っており、西独キャスクの品質を上回る容器の製造技術に関する国産化技術が確立された。

文 献

- 1) 井川克也, 外: 鋳物, 41 (1969), 8, 714
- 2) 張 博, 外: 鋳物, 55(1983), 2, 113

5. 球状黒鉛鋳鉄キャスク超音波探傷技術の開発

第1章で述べた通り球状黒鉛鋳鉄の強度設計は延性破壊については抗張力又は降伏点を基準とし、脆性破壊については欠陥サイズと破壊靱性値を基準としている。その中でも特に脆性破壊は瞬時に大破壊が生じる点で重要である。

しかしながら鋳鉄は内在する黒鉛が音波を減衰させるため厚肉の場合超音波探傷試験が困難であり、また検出すべき欠陥サイズが直径10mm程度と比較的小さいため放射線透過試験も困難であった。同様に破壊靱性測定法についてASTMでE399やE813で一応規定はされているものの鋳鉄への適用例が少なく、黒鉛多量析出状態での測定について統一的な考え方がなかった。またキャスクの設計によっては小型試験片しか採取できない場合もあり必ずしも大型CT試験片のみで対応できるわけではない。

そこで筆者らは超音波探傷試験の条件を選択することにより6mm直径程度の欠陥が検出可能な方法を見出すこと、および各種破壊靱性測定法を比較することによりValidな破壊靱性値を求める方法を検討した。

このうち本章では超音波探傷について述べ、破壊靱性測定法については第6章で述べる。

5.1 最近の技術動向と理論

超音波探傷により欠陥の大きさを評価する場合、探傷感度の調整が行なわれるが、その方法には、AVG線図による方法(試験片方式、底面エコー方式)、実体同材質の対比試験片による方法がある。

いずれの方法も距離振幅特性曲線を作成し、深傷して欠陥の大きさを評価するものであるが、キャスクに供されるDCIの場合、超音波の減衰は鋼材のそれに比べて非常に大きく(おんばが通りにくい)、超音波深傷には、それなりの考慮が必要である。

以下理論により深傷の可能性を詰め、実体(キャスクと同材質のDCI)の深傷データにより欠陥の大きさを評価の為の感度調整について述べる。更にDCIの深傷に有効な最新の技術について述べる。

5.1.1 理 論

1) AVG線図

超音波は遠距離になると拡散により減衰する。従って同一のサイズの欠陥でも遠距離

にある欠陥のエコー（反射波の大きさ）は近距離のそれより小さい。この関係は次式5.1.1で表わされる。

$$F/B_0 = (\pi G/n)^2 \quad (5.1.1)$$

$$\text{但し } G = d/D, \quad n = x/(D^2/4\lambda)$$

F 欠陥エコーの高さ

B₀ 極めて薄い板の底面エコー (X ≈ 0)

X 欠陥の位置

d 欠陥の直径

D 振動子径

λ 波長 (= 音速/周波数)

式5.1.1は、Xの位置にある円形平面欠陥（径d）に音波が垂直入射し、反射した場合に成り立つ。

反射面が大きな平面（即ち底面）の場合は次式（5.1.2）となる。

$$B/B_0 = \pi/2 n_B \quad (5.1.2)$$

$$\text{但し } n_B = T/(D^2/4\lambda)$$

T 底面までの距離（試験体の厚さ）

両式（5.1.1）、（5.1.2）を使用に供するため、線図で表わしたのがAVG線図であり、これを図5.1.1に示す。

2) 減 衰

DCIでは減衰は無視できずその補正が必要である。（図5.1.1に示したAVG線図は減衰のない、拡散のみによる音波の減弱を示す。）

① 減衰の定義：減衰定数αは次式（5.1.3）により定義される。

$$\alpha = \frac{(B_1/B_2) \text{ dB} - 6 \text{ dB}}{2T} \quad (5.1.3)$$

但し $n_B \geq 4$ 、底面の反射損失を含まず

B₁ 第1回底面エコー高さ

B₂ 第2回底面エコー高さ

② 減衰補正

減衰補正を加味したAVG線図は次式（5.1.4）、（5.1.5）によって修正される。

○ 底面エコー方式の場合

$$[F/B_0] = F/B_0 + 2\alpha(T-X) \quad (5.1.4)$$

但し $[F/B_0]$ 減衰を加味したF/B₀

T 底面までの距離

X 欠陥の位置

○ 試験片方式の場合

$$[F/B_0] = F/B_0 - 2\alpha(X-X_s) - 2\alpha X_s \quad (5.1.5)$$

但し X_s 標準試験片の欠陥位置

○ 対比試験片による場合

この方法は、実体同材質の試験片にて実施する為、減衰補正は不要。

3) 距離振幅特性曲線

① AVG線図および減衰補正により、距離振幅特性を計算すると、表5.1.1となる。

但し、計算では厚肉DCIを探傷する事を前提に次の条件を仮定した。

探傷周波数 0.5MHz (500 KHz)

探触子振動子径 20φmm

音速 5900m/sec

検出欠陥径 φ10mm平底円形相当欠陥*1

試験体厚 500mm（底面エコー方式の場合）*2

標準試験片 STB-G-V15-5.6 (JIS Z 2345, 試験片方式の場合)

減衰定数 α = 0.03 dB/mm*3

*1 検出欠陥径φ10mmはCASTORの判定基準を想定した。

*2 試験体厚 500mmはCASTORの厚肉部を想定した。

*3 DCIの減衰定数は、材質によりかなり変動するが、0.5MHzでの探傷、およびDCIが十分球状化しているものとしてα = 0.03 dB/mmとした。（後述5.2.2 1)参照）

計算では底面エコー方式（底面エコーB、Eを基準0 dBとした相対値）および試

試験片方式（標準試験片 STB-G-V15-5.6 の欠陥エコーを基準 0 dB とした相対値）を示した。両方式は、探傷感度の調整作業方法の相違であり、相対的には同一で、当然判定結果も同一である。

② 計算結果に基づき、作成した距離振幅特性曲線を図 5.1.2 に示す。

底面エコー方式の場合、試験体厚 500mm の底面エコー（BE）を基準としている。図 5.1.2 ① はその一例で、BE : 10% にセットし、図示の感度に高めた場合、10φmm 円形平面欠陥のエコー高さが、図示の曲線となることを示す。

試験片方式の場合、STB-G-V15-5.6 の欠陥エコーを基準としている。図 5.1.2 ② はその一例で、V15-5.6 : 100% にセットし、図示の感度に高めた場合、10φmm 円形平面欠陥のエコー高さが、図示の曲線となることを示す。

従って、検出した欠陥が、特性曲線より高いエコーを示した場合は、10φmm 円形平面欠陥より大きい欠陥である事を示している。

③ 対比試験片による距離振幅特性曲線

超音波探傷において、基本的な測定は、反射源（欠陥）からのエコーの位置と大きさであり、その絶対値を測定することが重要である。この方法は試験体と同材質の試験片に、人口欠陥を加工し、測定することにより距離振幅特性を求めるものである。

特に絶対値が求められるため、対比試験片を基準として、現場的に簡便に使われ、更に AVG 線図にマッチしない探傷装置（主に特殊探触子）には有効に使われる。従って DCI キャスクの探傷には、この方法による探傷を採用する。人口欠陥は φ10mm 平底円形欠陥とする。距離振幅特性曲線はこの対比試験片にて作成する。減衰補正は、当然不要である。

4) その他の補正

超音波探傷におけるその他の感度補正項目として、表面性状による補正、曲率による補正がある。

① 表面性状による補正

探傷面があらの場合、探傷を底面エコー方式で行なえば、表面性状の影響は受けにくいと云える。しかし、探傷面が▽▽▽仕上（JIS 6S 相当）の標準試験片（STB）

や、仕上の良い対比試験片（RB）で感度設定後、あらい面を探傷する場合は、適当な感度補正を要す。この表面性状による補正についていくつかの報告^{17)・21)・23)}があるが、その一例を図 5.1.4 に示す。

② 曲率による補正

円筒状の試験体の探傷の場合、探傷を底面エコー方式で行なえば、表面曲率の影響を受けないが、STB（探傷面が平面）や曲率のない RB にて感度設定後、曲率のある面を探傷する場合、探触子の中央部のみが探傷面と接触するため、感度が低下する。

この曲率による感度補正についてもいくつかの報告^{21)・23)・43)・51)}があり、その一例を図 5.1.5 に示す。

5.1.2 探傷の可能性について

DCI の超音波探傷では減衰の影響は無視できず、理論にも減衰を加味した。

実際の探傷の場合、減衰の影響により生じる「林状エコーによる SN 比の低下」更に「感度余裕」の問題がある。この程度により探傷の可能性が決る。

1) 減衰定数について

① 所有の DCI ブロック（ステープクーラから加工した一般の DCI でありキャスク用の DCI ではない）により減衰を測定した。

測定条件	試験材	ステープクーラー用テストブロック
	厚（平行面）	T = 128mm
	探傷面および底面の仕上	▽▽▽
探傷器	USIP-11（クラウトクラマー製）、FD 410S	
		（三菱電機製）
探触子	BIS-N（1B24N）、B 0.5SL（0.5B38N）	
	1Z25N、1Z30N、以上三菱電機製	

測定結果

探 傷 器	探 触 子	減衰定数 (α)	参 考
USIP-11	B1S-N	0.0625 dB/mm	周波数 1 MHz, 振動子径 24 ϕ mm
	B 0.5SL	0.0312 dB/mm	周波数 0.5 MHz, 振動子径 38 ϕ mm
FD 410S	1 Z25N	0.0625 dB/mm	周波数 1 MHz, 振動子径 25 ϕ mm
	1 Z30N	0.070 dB/mm	周波数 1 MHz, 振動子径 30 ϕ mm

但し、測定は底面エコー B_1 および B_2 を測定し、理論式5.1.3により算出した。
(探傷器による測定である事および底面の反射損失を入れていない為、精密な値ではない。)

② 図5.1.6は三菱重工における報告⁶⁾(日本ダクティル鋳物協会、第53回技術委員会資料)を示す。またMannesman-Demag-MEER Foundry Firm in Munchen-Gladbachのレポート(The Echo 30-Krautkramer Report)⁷⁾による値も併記した。

当方の減衰測定結果と比較すると、いずれも低い値を示している。周波数 0.5 MHz の場合、当方の測定がやや高目となった。

以上からDCIの減衰は、周波数 0.5 MHz の場合0.03 dB/mm前後と予想される。

2) 感度余裕について

遠距離の探傷では、減衰の大きい材料は、感度を高めて測定するが、探傷装置(探傷器、探触子、ケーブル等)の性能によっては、感度を高めても林状エコーによるSN比の低下から、十分な探傷ができない場合がある。そこで感度余裕について調査した。

調査の手段として、本体(製品)を直接測る底面エコー方式および本体同材質、同サイズの対比試験片による方式が簡便で有効であるが、対比試験片がない場合にはこの方式では検討できない。

そこで、標準試験片を用いて、減衰およびAVG線図を元に測定して調査した。

測定条件 探傷器 USIP-11(クラウトクレマー)

探触子 B1SN, B0.55L

標準試験片 STB-G-V15-5.6

DCIブロック(厚 128mm)

測定結果

(1) STB-G-V15-5.6: 10%におけるゲインMAX(余裕0 dB)までのdB量

0.5 MHz の場合 75 dB

1 MHz の場合 68 dB

(2) DCIブロックにて距離 500mmにおけるゲインMAX(余裕0 dB)時のノイズレベル

0.5 MHz の場合 90~100%

1 MHz の場合 60%

(3) DCIブロックにて距離 500mmにおけるノイズレベル10%とするゲインMAXまでのdB量

0.5 MHz の場合 16 dB

1 MHz の場合 20 dB

測定結果と表5.1.1(理論計算値)を比べると、十分感度余裕があり $\phi 10$ mmの欠陥検出は十分可能である。

5.1.3 減衰材探傷における最近の技術

DCI製キャストの最大厚肉部約 500mmの超音波探傷について、欠陥の大きさ $\phi 10$ mm円形平底穴のエコーでは、ほぼ検出できる見通しを得た。

合否基準 $\phi 10$ mm以下が必要な場合、合否限界以下の欠陥を詳しく調査する場合、更に減衰が仮定($\alpha=0.03$ dB/mm)より相当大きい場合、感度補正(表面性状、曲率による)が大きい場合等、仮定を大中に越える場合は、前記の一般的な探傷方法では難点がある。

そこで、以下、減衰材の超音波探傷について、最近の技術を記す。

1) 送信電圧（印加電圧）を高める方法

原理は、減衰によるエネルギーの損失を送信電圧の上昇により補ない、遠距離まで音波を通り易くするものである。

遠距離の欠陥の検出は可能とはなるが、逆に近距離では不感帯が長くなり一長一短はさけられない。

2) 焦点型探触子

減衰は、試験体の結晶粒が粗大な場合、結晶粒により超音波が散乱して生じる。超音波のビームを絞り、超音波の拡がり小さくすれば、雑音域の通過が少なくなり、エネルギーは集中する。従って減衰の影響を少くできる。但し焦点がある為、その近傍の音圧は高められるが、測定範囲全長をカバーできず、この為、特定の目的に使用される。探傷感度の設定には当然AVG線図に乗らない為、対比試験片にて行なう。

3) 広帯域探触子

一般に周波数の高い超音波は散乱し易く、減衰する。従って減衰のある材料では一般に低い周波数を選ぶ。

減衰の大きな材料では高周波成分がカットされ、反射エコーの中心周波数は低下する（材料がローパスフィルターの働きをする）。従って従来の狭帯域の探触子では、限られた狭い周波数範囲内しか受信できず（感度がない為）、感度が低下し、補正として感度を増幅すると林状エコー等のノイズも増幅され、SN比は低下する。

これに対して、広帯域の探触子では、高域の周波数はカットされても低域の感度はある為、感度upも少なくSN比の低下にならない。

特に広帯域探触子は送信波のダンピングが大きく（狭帯域探触子よりも）従って、エコー波形が鋭い為、不感帯は短く、分解能は良い。

送信周波数が広帯域である事、および受信周波数は高域をカットされた不定（物によって決る）の周波数である事から、広帯域探触子に合った探傷器が必要である。

また探傷感度の設定には、連続波の理論から出発したAVG線図は当てはまらず、従って試験方方式、底面エコー方式は適用できず、結局対比試験片による方法で行なう。

4) スエプトフリケンシー法（送信周波数可変方式）

前記の広帯域探触子で述べた通り、減衰材では透過できる周波数が一定以下のものに限られている。この周波数は、材質、路程（ビーム路程）によって異なり、低すぎる周波

数では欠陥検出能力の低下となる。そこで減衰材では透過可能な範囲で最も高目の周波数が最適な周波数と云える。

この考え方にて開発された方式がスエプトフリケンシー法である。

原理は、超音波の送信部に「一定サイクルの連続波を三角波または正弦波変調して、高調波のない特定周波数にコントロールした」波を与えて探傷するもの。より特定の周波数のみにコントロールし、帯域幅もコントロールした狭帯域パルスを使う。従って理想の周波数にコントロールされた探傷の為、減衰の影響が少なく、SN比が高く（高調波がない為）、感度が向上し（エネルギーが単一）、検出能力が高くなる（低い周波数成分なし）探傷を可能にする。

探傷器にはコントロール機構を付加し、探触子も特殊探触子が必要である。

また探傷感度の設定は、対比試験片にて行なう。

以上紹介した減衰材に対する各新技術は既に開発市販された技術であり、鋳物（含DCI）等減衰材の探傷にも多くの実績を提供しつつある。

従って、今回対象としたキャスク用DCIについても超音波による探傷は十分可能である。

5.1.4 今後の課題

以上、DCI製キャスクの厚肉部を想定して、一部実測データを元に検討し、超音波探傷が可能と判断した。今後以下の残された課題を検討・解決していく。

- 1) 対比試験片の作成および距離振幅特性の検討
- 2) 特殊装置（減衰材探傷）による検討
- 3) 試作確性試験に対応した検討
- 4) その他

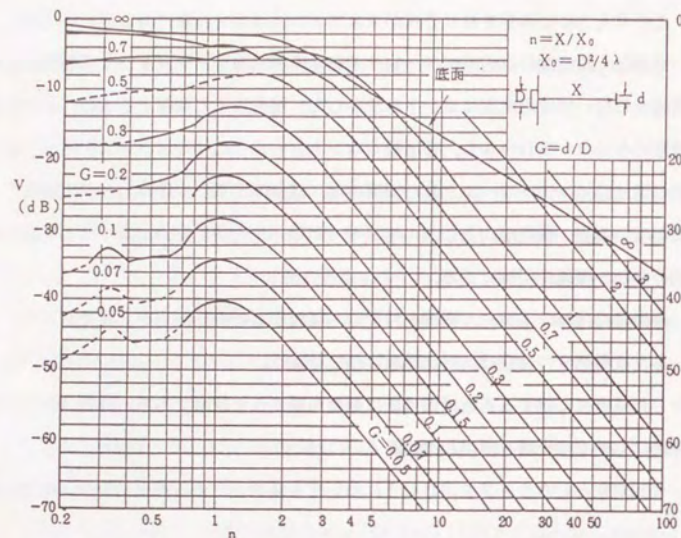


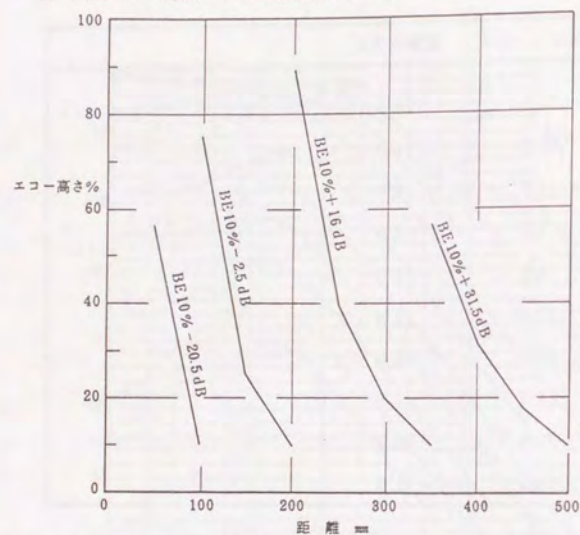
図5.1.1 AVGダイアグラム

表5.1.1 距離振幅特性計算結果

距離	底面エコー方式	試験片方式
mm	d B	d B
50	35.5	26.0
100	20.5	11.0
150	10.5	1.0
200	2.5	-7.0
250	-4.5	-14.0
300	-10.5	-20.5
350	-16.5	-26.0
400	-21.5	-31.0
450	-26.5	-36.0
500	-31.5	-41.0

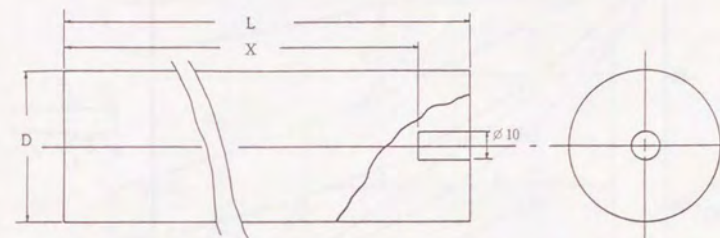
条件 周波数 0.5MHz, 振動子径 20φmm, 音速5900m/sec
 検出欠陥径 10φmm円形平面相当欠陥
 試験体厚 500 mm
 標準試験片 STB-G-V15-5.6
 減衰定数 $\alpha = 0.03 \text{ dB/mm}$

① 底面エコー方式による距離振幅特性曲線

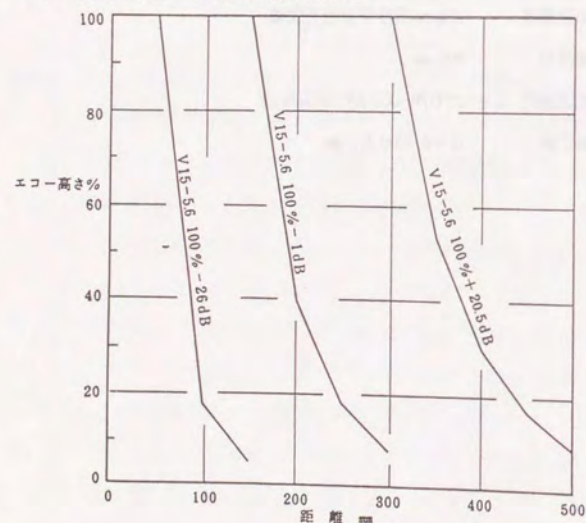


条件

周波数 0.5 MHz
振動子径 $20\phi_{mm}$
音速 $5900 m/sec$
欠陥径 $10\phi_{mm}$
試験体厚 $500 mm$
減衰定数 $\alpha = 0.08 dB/mm$
BE: 底面エコー



② 試験片方式による距離振幅特性曲線



条件は①と同じ
但し、標準試験片
STB-G-V15-5.6

No.	L	X	D	重量 (参考)
1	50 mm	25 mm	$\phi 50 mm$	0.7 kg
2	75	50	50	1.1
3	100	75	50	1.4
4	175	150	75	5.8
5	275	250	100	16.2
6	375	350	125	35
7	475	450	150	63

図5.1.3 対比試験片寸法

図5.1.2 距離振幅特性曲線

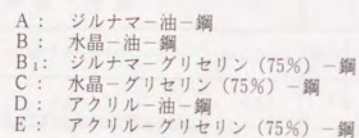


図5.1.4 表面あらさの深傷感度におよぼす影響(木村)²⁾
(探傷面を三角波と仮定して算出)「非破壊検査」第28巻第9号

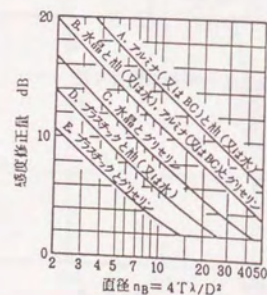


図5.1.5 試験材の直径と感度修正量³⁾

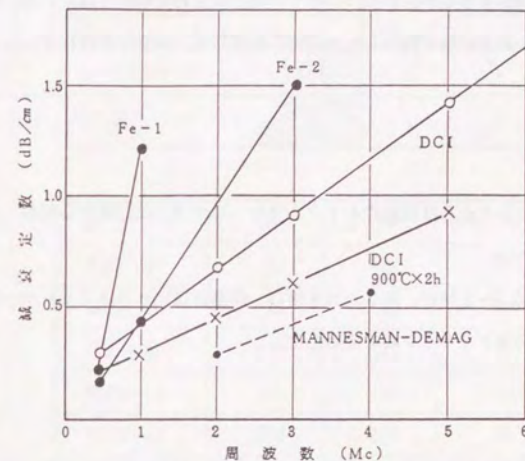
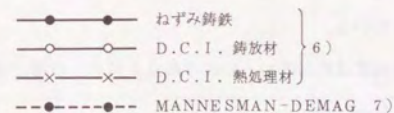


図5.1.6 ねずみ鋳鉄とD.C.I.との減衰比較^(6), 7)
Comparison of the attenuation between
gray cast iron and ductile cast iron



5.2 基本特性の調査

前項で述べた通り原理的には厚肉球状黒鉛鋳鉄の超音波探傷検査は可能であることがわかったが、実際に検出できるか否かについて十分確認なされたわけではない為、第3章の1/2スケールモデル鋳造試験で製作した供試材を使用して、減衰がどの程度になるのかを調査した。

5.2.1 調査条件

図5.2.1に示すような試験片を1/2スケールモデル供試体から採取し、距離振幅特性曲線を求めた。

探触子は0.5~2MHz用B24Nを用い、探傷器はクラウトクレマー社USIP11、接触媒質は90%グリセリン液を使用した。

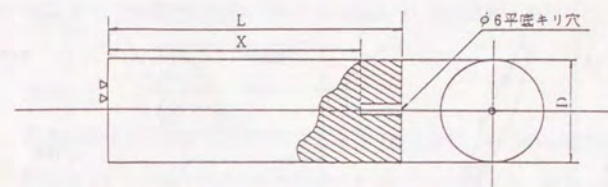
5.2.2 調査結果

調査結果を図5.2.2に示すが0.5MHzまたは1MHzであれば約500mm厚みまで探傷は十分可能であり、垂直方向φ6mmまで検出できることがわかる。

この結果は表5.1.1に示した減衰定数 $\alpha = 0.03 \text{ dB/mm}$ の場合と比較すると2/3程度の減衰となっている。

また縦波の速度は約5400m/sec.であり1MHzの場合の半波長は2.7mm、0.5MHzでは5.4mmとなる。

以上の結果から厚肉球状黒鉛鋳鉄の超音波探傷検査は1MHzで実施するのが好ましいことがわかる。



記 号	L [mm]	X [mm]	φ D [mm]
B 25-6	50	25	50
B 50-6	75	50	50
B 75-6	100	75	50
B 100-6	125	100	75
B 150-6	175	150	75
B 200-6	225	200	100
B 250-6	280	250	100
B 300-6	330	300	125
B 380-6	410	380	125
B 450-6	480	450	125

図5.2.1 試験片形状

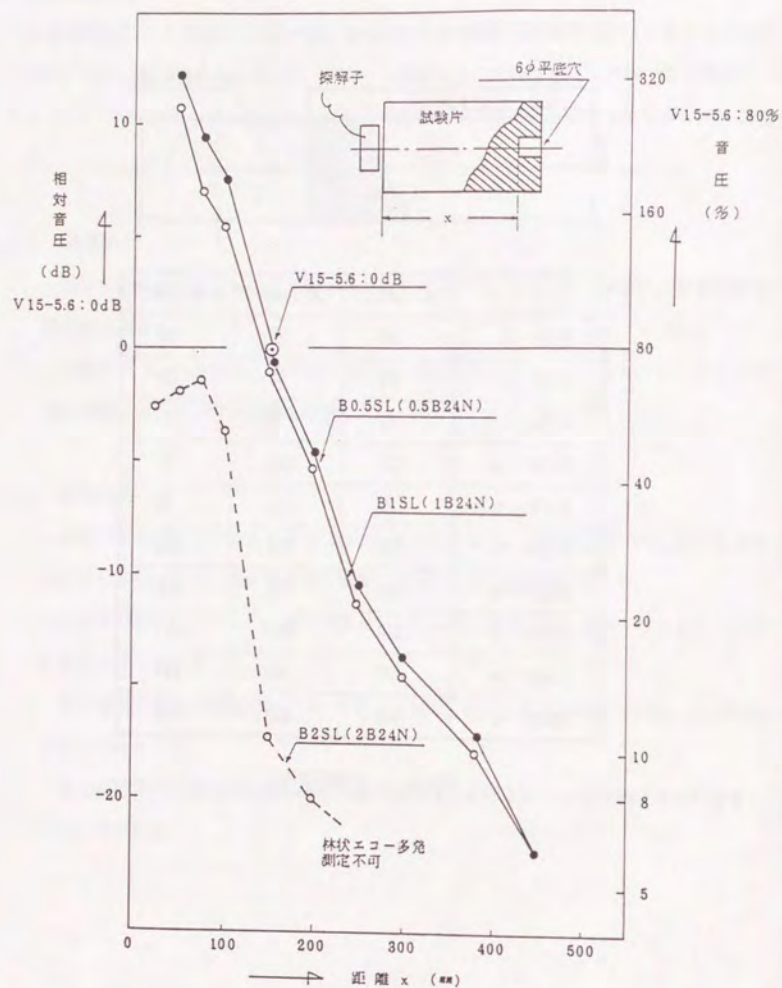


図5.2.2 距離振幅特性曲線 (DAC)

5.3 フルスケールモデルを利用した確認試験

第4章で述べたフルスケールモデルを供試材としてより正確な検出限界を求めるとともに将来の実機化時の超音波探傷検査の条件を定めるべく確認試験を実施した。

5.3.1 試験方法

距離振幅特性曲線を作成し、エコー高さ（裏返せば、探傷器の感度余裕）、SN比、分解能などから欠陥の検出限界を明確にする。この結果より、実機生産時の超音波探傷の条件を決定する。

なお、距離振幅特性曲線を作成するときに使用した基準欠陥は

垂直探傷用：φ6mm平底縦穴

斜角探傷用：φ9mmキリ横穴

とした。（図5.3.1 参照）。基準欠陥は通産省告示第501号に従った。

① 試験片作成要領

図5.3.1に示すように、キャスク側壁部からまず大試片を切り出し、その大試片から、距離振幅特性曲線作成用試験片を加工した。

② 探傷条件

a 探触子

垂 直			斜 角		
周波数	寸 法	メ ー カ ー	周波数	寸 法	屈折角
1 MHz	φ24mm	クラウトクレーマー	1 MHz	φ24mm	45°
2 MHz	φ24mm	クラウトクレーマー	2 MHz	φ24mm	45°
5 MHz	φ24mm	クラウトクレーマー	5 MHz	φ24mm	45°

b 探傷機器

名 称	全感度	用 途	メ ー カ ー
USIP11	90dB		クラウトクレーマー
USM 2	80dB	ポータブル	クラウトクレーマー

c 接触媒質

グリセリン

d 距離設定

垂 直	斜 角
最長の試験片の底面エコーを使用	試験片にあけた $1/4 T$, $1/2 T$ (T : 板厚 = 480mm) のエコーによった

③ エコー高さの測定

エコー高さが CRT 管面で 80% になる A T T の値 (dB 単位) で、表現した。

5.3.2 試験結果

図 5.3.2 に試験結果としての距離振幅特性曲線を示す。機種による相違はあるがフルスケールモデルなみの金属組織条件であれば、垂直法で $\phi 6$ mm, 斜角法で $\phi 9$ mm までは十分探傷可能であり 0.5MHz であれば探傷器として全感度 80 dB 以上あればよいことがわかった。

5.3.3 考 察

- ① 実機化時を想定した場合の推奨探傷条件を表 5.3.1 に示すが、このような条件で探傷すれば球状黒鉛鋳鉄でも十分に超音波探傷が実施できる。
- ② 5.2 節の結果と比較すると 2MHz での音波減衰度が少ないが、これは鋳造方案の差に起因すると考えられる。即ち 5.2 節の供試材は内面にダイレクトチル砂型を用いているのに対し、本項で用いた供試材は内面にも金型を用いており、凝固時の冷却速度が全体的に上昇しているため全体的な金属組織の粗さが低減したためと推定される。

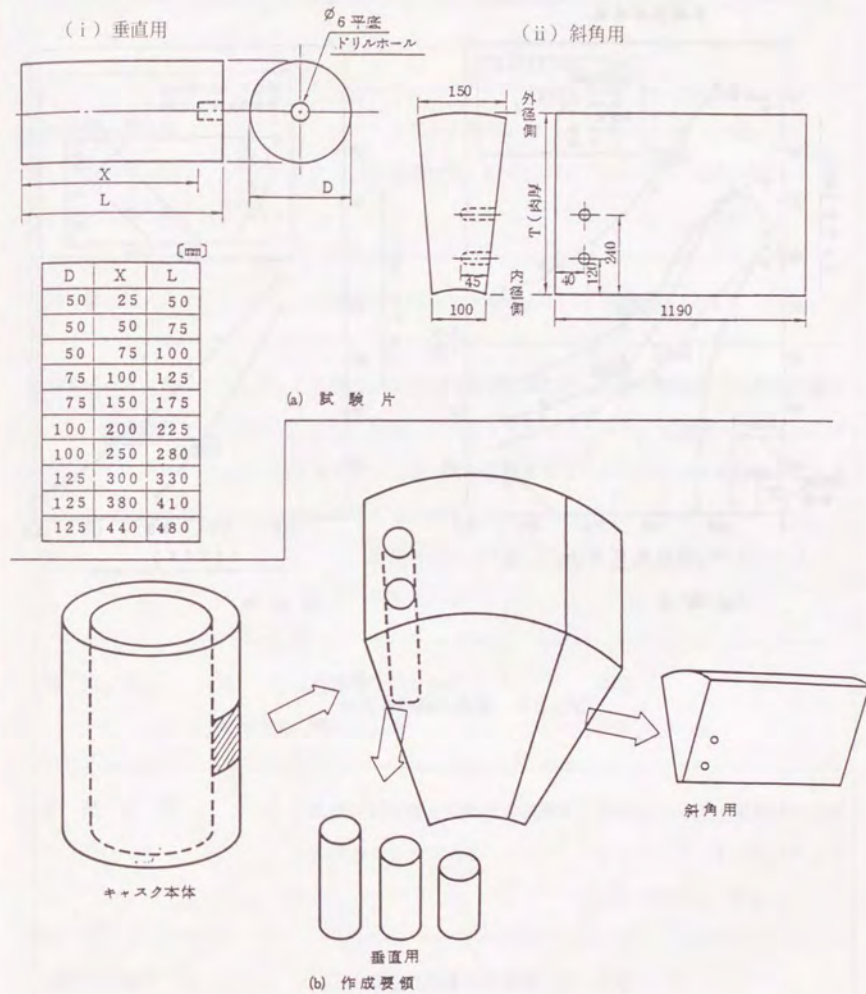


図 5.3.1 試験片

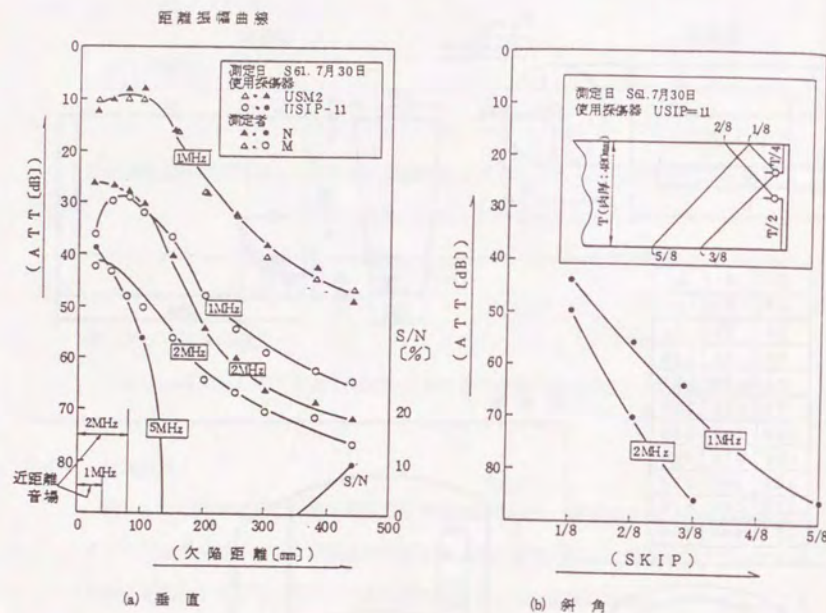


図5.3.2 距離振幅特性曲線

表5.3.1 推奨探傷条件

項 目	垂 直	斜 角 ^{*1}
探触子 周波数 寸 法 屈折角	1又は2MHz φ20~25, 口 —	1MHz □20~25 45°
探 傷 器	全感度が80dB以上あること	同左
探触子と 探傷器のマッチング ^{*2}	実機と同材質・同板厚試験片の φmm6平底穴のエコーを80%高 さとしたとき, 次の条件をと もに満足すること 感度余裕≥10dB SN比≥2	実機と同材質・同板厚試験片 の3/8スキップ・φmm9ヨ コ穴エコーを80%としたとき 感度余裕≥10dB SN比≥2
検 査 面 部 位 表面仕上	内外面 [*] の全表面 機械加工後	同左 同左
距 離 設 定	実機と同材質・同板厚の試験片 の底面エコーによる	実機と同材質・同板厚の試験 片の3/8, 1/4スキップ ・ヨコ穴エコーによる
合否判定基準 ^{*4}	以上の条件で距離振幅曲線を作 成し, 曲線より上にエコーが現 れたら, 不合格欠陥とする	同左

- * 1 斜角探傷が必要か否かについては* 3で述べる。
- * 2 探触子、探傷器がともに上の条件を満足していても、感度やS/N比が不足する場合があるので、この項を追加した。
- * 3 上の条件を満足すれば、垂直の場合板厚 500mm程度は $\phi 6$ mm平底欠陥は検出可能であるが、探触子側約 100mmは不感帯や近距離音場のため欠陥評価ができない。この事情は斜角探傷も同様（図5.3.3）。したがって全体積を探傷するためには内外面からの探傷が必要であるが、図5.3.4 に示すように垂直のみでは、 N_1 および N_2 は評価不能部分となるので、そこについては A_1 、 A_2 の斜角探傷が必要となる。
- * 4 ここでは、図5.3.5 に示すように、エコーが距離振幅曲線の下にあるか上にあるかによって単純に合格・不合格とすることを提案する。

これに対し通産省告示は、エコーが曲線の上にあっても、欠陥が小さい場合には合格すると規定している。しかし、欠陥の大きさを測定する方法の規定がないことや、可否の限界寸法が最小でも25mm（円形換算直径）もあり、キャスクの場合の8～6mm ϕ に比較すると大きすぎることなどから通産省告示は不十分であると判断した。

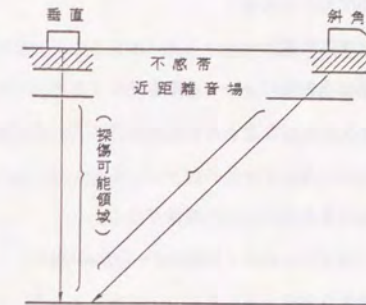


図5.3.3 探触子近傍の評価不能領域

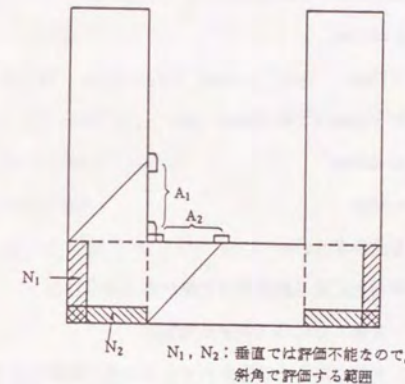


図5.3.4 外周コーナー部の探傷

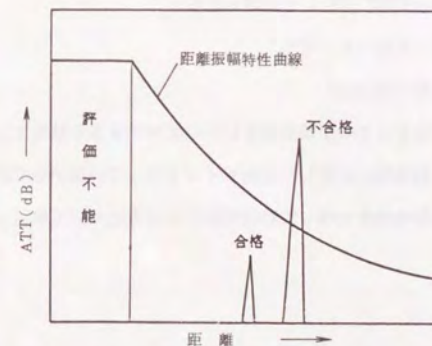


図5.3.5 欠陥の合否判定 (案)

③ 通産告示 501号の問題点と対策

a 6条1項4号(探傷範囲)

内 容: 片側の全表面について走査を行なうこと。

問題点: 微小欠陥を対象とするため不感帯・近距離音場の影響が強くなり、片側では不十分ではないか。

対 策: 両側の全表面について義務づける。

b 6条5項2号(可否判定基準: 肉厚300~600mmの場合)

内 容: 距離振幅曲線を超えるエコーであっても次のイからホまでに適合すれば合格

イ. とともに次の条件を満足すること

面積 $\leq 3200\text{mm}^2$

長さ $\leq 75\text{mm}$

ロ. 表面から25mm以下の欠陥は

面積 $\leq 500\text{mm}^2$

長さ $\leq 38\text{mm}$

ハ. 厚さ方向長さ $\leq 25\text{mm}$

ニ. 同一平面上にある複数個の欠陥がある場合には

(イ) 同一欠陥* でない(別々の欠陥)

(ロ) 同一欠陥であると認定されてもイの条件を満足する

ホ. 複数個の欠陥があれば

(イ) 同一欠陥* でないと認定される

(ロ) 同一欠陥であっても

面積 $< 1900\text{mm}^2$

*同一欠陥とは互の距離が大きい方の欠陥の長さを越えていないとき

問題点: 材料特性に合致した欠陥サイズとなっていないのではないのか

対 策: 材料特性を加味して許容欠陥サイズ等について検討し、法制化する。

5.4 まとめ

鋳鉄への超音波探傷検査の適用は、従来は困難であると言われていたが、球状黒鉛鋳鉄でその製造条件が適切であれば、検査条件として表5.3.1に示すような適正な条件を選択することにより、 $\phi 8\text{mm}$ 以上の探傷は十分可能であることが判った。なお判定基準については設計条件にもよるが、通産告示第501号では不十分であり、材料の破壊靱性を加味して決めていく必要がある。

参考文献

- | | |
|--|-----------------|
| 1) 「超音波探傷試験 B. 1979」 | 日本非破壊検査協会 |
| 2) 「非破壊検査 Vol. 28, No.29」 | 日本非破壊検査協会 |
| 3) 「J F S S-13 S 57.7」 | 日本鋳鍛鋼会 |
| 4) 「ASME Boiler & Pressure Vessel Code
Sec. V, Art. 5, 1978 Win. Add」 | ASME |
| 5) 「NDIS-2411-'80」 | 日本非破壊検査協会 |
| 6) 「第53回技術委員会資料」 | 日本ダクタイル鋳物協会 |
| 7) 「The Echo 30 (11/'82) 31 (3/'83)」 | Kraut Kramer社資料 |