

JAERI - M
93-002

高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準
における材料検査の検討

1993年1月

伊与久達夫・多喜川 昇・塩沢 周策・沢 和弘
辻 延昌^{*1}・山田 邦貴^{*2}・杉原 哲哉^{*3}

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準における材料検査の検討

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部
伊与久達夫 ・ 多喜川 昇 ・ 塩沢 周策 ・ 沢 和弘
辻 延昌*¹ ・ 山田 邦貴*² ・ 杉原 哲哉*³

(1993年1月5日受理)

高温工学試験研究炉(H T T R)の黒鉛検査基準は、材料検査、非破壊検査、寸法検査及び外観検査から成る。材料検査については、黒鉛及び炭素材料に対して特に考慮する項目について解説されているが、その詳細は一部規定されていない。このため、銘柄検査、不純物検査及び機械的強度検査から成る材料検査について、特に黒鉛及び炭素材料に特有の検査方法、判定基準等を検討した。検討に際しては、H T T Rで使用する黒鉛及び炭素材料について、従来取得してきたデータ等を体系的に調査・分析すると共に、製造メーカーの実績を考慮した。

検討の結果、一部明確に規定されていなかった材料検査における検査方法及び判定基準を具体的に設定することができた。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀3607

*1 富士電機株式会社

*2 川崎重工業株式会社

*3 東洋炭素株式会社

Evaluation for Material Inspection of Graphite Inspection Standard
in High Temperature Engineering Test Reactor

Tatsuo IYOKU, Noboru TAKIKAWA, Shusaku SHIOZAWA
Kazuhiro SAWA, Masanobu TSUJI^{*1}, Kunitaka YAMADA^{*2}
and Tetsuya SUGIHARA^{*3}

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1993)

The graphite inspection standard for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) consists of material, nondestructive, dimensional and visual inspections. The inspection method and judgement criteria in the material inspection are not detailed in some items, although some explanations are provided for the items especially necessary to be considered in the inspection. Therefore, inspection method and judgement criteria in the material inspection which contains material grade, impurity and mechanical strength inspections, are fully evaluated on the basis of the feature of these materials. Material inspection method and judgement criteria for HTTR graphite and carbon are evaluated in consideration of the research data and manufacturing experiences.

As a result, inspection method and judgement criteria can be established, which are to be applied to the graphite and carbon internal acceptance tests of HTTR.

Keywords: HTTR, Graphite, Carbon, Gas-cooled Reactor, Inspection
Standard, Acceptance Test Criteria

*1 Fuji Electric Co., Ltd.

*2 Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

*3 Toyo Tanso Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. HTTR黒鉛及び炭素の材料検査	3
2.1 検査時期	3
2.2 IG-110 黒鉛	3
2.3 PCX 黒鉛	5
2.4 ASR-ORB炭素	5
3. 検査方法	8
3.1 銘柄検査	8
3.2 不純物検査	8
3.3 機械的強度検査	8
3.4 高温寸法安定性検査	9
4. 判定基準	11
4.1 銘柄検査	11
4.2 不純物検査	11
4.3 機械的強度検査	11
4.4 高温寸法安定性検査	14
5. おわりに	27
謝 辞	27
参考文献	28

Contents

1. Introduction	1
2. Material Inspection Standard for HTTR Graphite and Carbon	3
2.1 Inspection Time	3
2.2 IG-110 Graphite	3
2.3 PGX Graphite	5
2.4 ASR-ORB Carbon	5
3. Inspection Method	8
3.1 Grade Inspection	8
3.2 Impurity Inspection	8
3.3 Mechanical Strength Inspection	8
3.4 Dimensional Stability Inspection at High Temperature	9
4. Judgement Criteria	11
4.1 Grade Inspection	11
4.2 Impurity Inspection	11
4.3 Mechanical Strength Inspection	11
4.4 Dimensional Stability Inspection at High Temperature	14
5. Concluding Remarks	27
Acknowledgements	27
References	28

1. はじめに

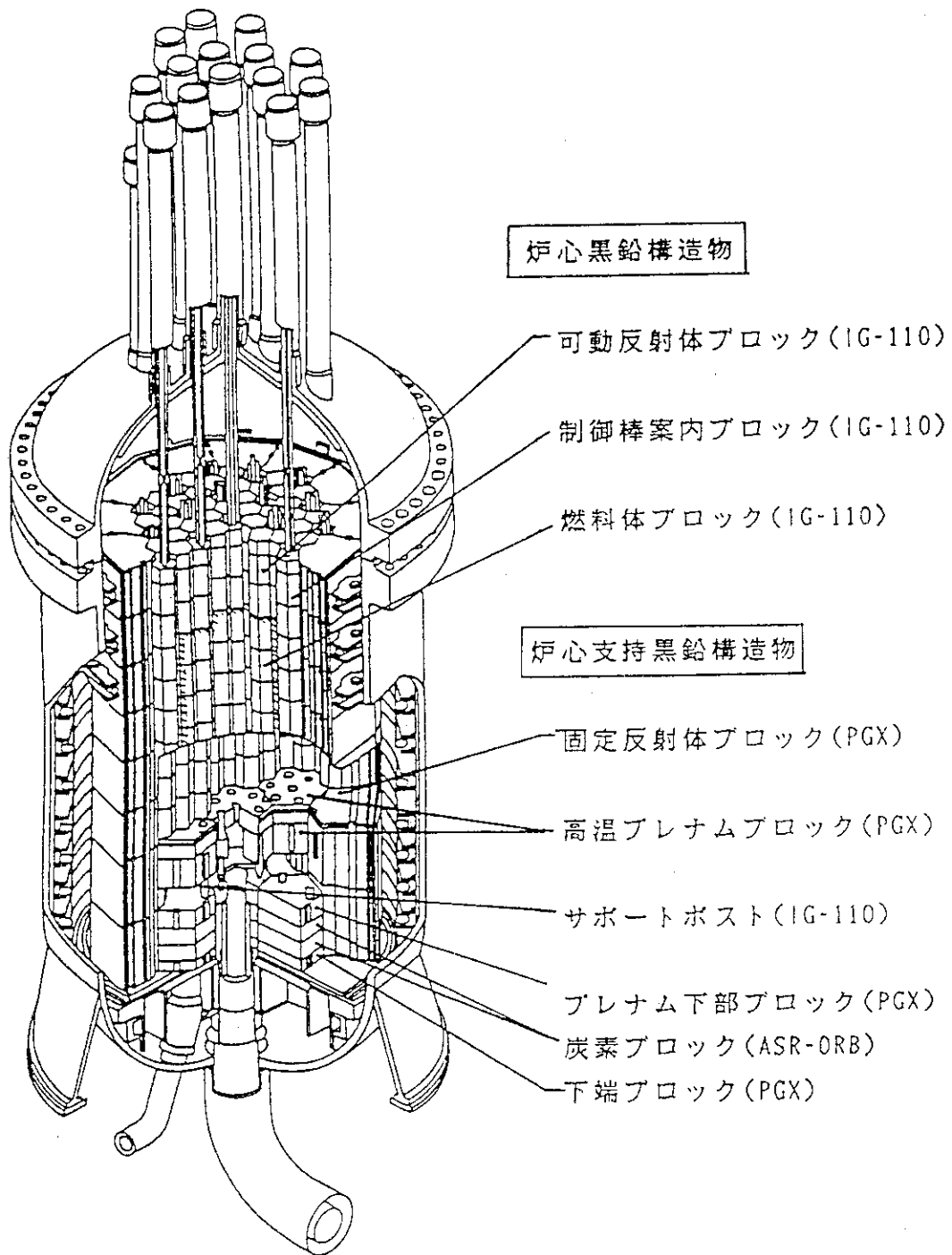
高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心は高温となるため、炉内の構造物には、耐熱性に優れた黒鉛、炭素などを主要材料として使用する。炉心は、六角柱状の黒鉛ブロックである燃料体の黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック等を円柱状に積上げたものである。さらに、炉心を支持し荷重を圧力容器へ伝えるとともに熱遮へい、放射線遮へい等のために、固定反射体ブロック、高温プレナムブロック、サポートポスト、炉床部断熱層等からなる炉心支持黒鉛構造物を設けている。HTTR炉心及び炉内構造物の構造図を第1.1図に示す。

HTTRで使用する黒鉛及び炭素材料は、炉心黒鉛構造物、サポートポスト等には原子炉級微粒等方性黒鉛IG-110黒鉛（東洋炭素株式会社製）、固定反射体ブロック等の大型の炉心支持黒鉛構造物には原子炉級準等方性黒鉛PGX黒鉛（米国UCAR社製）及び炉床部断熱層の炭素ブロックにはASR-ORB炭素（ドイツSIGRI社製）である。

これら黒鉛及び炭素製の構造物の設計、使用材料の選定及び検査は、「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」⁽¹⁾に基づいて行う。しかしながら、参考文献(1)では、使用材料は別途定める「黒鉛検査基準」に適合するものとする、としているのみである。そこで、日本原子力研究所(原研)では、これら構造物の品質を保証するために黒鉛検査基準を検討した⁽²⁾。文献(2)の黒鉛検査基準は、銘柄検査、不純物検査及び機械的強度検査からなる材料検査、非破壊検査、寸法検査及び外観検査からなる。ここで、材料検査においては、一般的な方法は省き、黒鉛及び炭素材料に対して特に考慮する項目に対してその基本的考え方を解説している。判定基準については、設計等により変わり得るものであることから、検査基準の本文では一般的な表現で規定し、参考として文献(2)では付録に判定基準の具体的な目安を示しているが、これらの数値等は当時のHTTRの炉設計等に基づく概略値である。

このため、製造メーカー及び原研が行う材料検査における検査方法、判定基準等を検討した。検討に際しては、HTTRで使用する黒鉛及び炭素材料について、従来取得してきたデータを体系的に調査・分析し、データが不十分な項目については新たに試験を行うと共に、製造メーカーに問い合わせた最新の製造実績を考慮した。更に、HTTRの設計の詳細化により、核的特性及び遮蔽設計を保証するために実施する不純物検査を検査自体の見直しを含めて検討した。

本報告は、HTTRの「黒鉛検査基準」のうち材料検査基準の検査方法、判定基準等を検討したものである。



第1.1図 HTTRの黒鉛構造物

2. HTTR黒鉛及び炭素の材料検査

2.1 検査時期

第2.1図は、検査のためのサンプリング時期と黒鉛及び炭素の製造工程の関係を示したものである。ここで、高純度化を施すIG-110黒鉛については、灰分を除く銘柄検査及び機械的強度検査を、あらかじめ高純度化前後でその特性に差がないことが示されれば、粗加工の段階で実施してよいとしている⁽²⁾。

そのため、検査の実施時期を明確にするために、IG-110黒鉛について高純度化前後の特性変化を調べた。試験項目は、灰分を除く銘柄検査項目であるかさ密度、固有抵抗、曲げ強さ及び熱膨張係数、並びに機械的強度検査項目である引張強さと圧縮強さである。

試験は、高純度化前後の3ロットを対象に、第2.1表に示すように、各試験項目に対して統計的に処理できる試料数について行った。なお、熱膨張係数については、同一の試料を高純度化前後で測定した。各試験項目の平均値、標準偏差及び有意差検定の結果も第2.1表に示す。

有意差検定⁽³⁾は、危険率5%と1%で実施した。その結果、一般に用いられる危険率5%においても同表に示すように全ての試験項目に対して、高純度化前後で有意差は認められない。

以上のことより、IG-110黒鉛については、灰分を除く銘柄検査及び機械的強度検査は、高純度化前の粗加工段階で実施することもできる。

2.2 IG-110黒鉛

原子炉級微粒等方性IG-110黒鉛は、燃料体の黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック等の炉心黒鉛構造物、サポートポスト等の炉心支持黒鉛構造物及び混合促進板に使用する。これらIG-110黒鉛の材料検査として、銘柄検査、不純物検査及び機械的強度検査を実施する⁽²⁾。

(1) 銘柄検査

材料がIG-110黒鉛の銘柄であることを保証するために行う銘柄検査は、製造メーカーの実績に基づいて行う。

(2) 不純物検査

不純物検査とし灰分を検査すると共に、炉心黒鉛構造物のIG-110黒鉛に対しては、核的特性及び遮蔽設計を保証するためにほう素当量並びに放射化性不純物検査を行うことになっている⁽²⁾。ここで、参考文献(2)で規定している検査項目は、

原研の高温ガス炉臨界実験装置(VHTRC)、大型構造機器試験ループ等研究用に製造された黒鉛構造物等の検査を基礎とし、米国の高温ガス炉Fort St. Vrain炉及び国内の東海1号炉用黒鉛構造物等の検査を参考とすると共に、HTTRの炉特性及び設計上の要求も考慮して定められている。このため、VHTRCで特に重要となるほう素当量等の不純物検査は、HTTRに関する安全上の要求から規定しているものでなく、ほう素当量及び放射化性不純物は、あくまで、HTTRの核的特性及び取扱までも含めた遮蔽設計の観点から検査項目としている。

HTTRの核設計において、炉心黒鉛構造物のほう素当量は、IG-110黒鉛材の実績に基づき1ppmで計算している⁽⁴⁾。ここで、IG-110黒鉛材中のほう素当量の変動したとしても、HTTRの安全上問題になることはなく、燃焼日数に影響を及ぼすのみである。このため、炉心黒鉛構造物に対するほう素当量の検査は安全上の観点から削除することができる。

遮蔽計算における遮蔽線源は、炉心部の燃料体中で核分裂によって発生する中性子及びガンマ線並びに中性子を捕獲する反応に伴って生成するガンマ線及び1次冷却材中へ放出される核分裂生成物からのガンマ線に大別される。ここで、運転中の遮蔽設計においては、炉心部の核分裂による放射線が支配的であり、炉心黒鉛構造物中に含まれる不純物による影響は無視し得る。しかしながら、炉心黒鉛構造物は、一定期間運転後原子炉から取り出して検査等を行う可能性があるため、その取扱時を考慮して放射化性不純物検査を行うことにしていた。しかしながら、現状、燃料交換機等の取扱設備は、燃料体を取扱えるように対応している。このため、燃料体の黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック等の炉心黒鉛構造物の放射化性不純物検査は、安全上の観点及び取扱上の観点からも不要と考えられる。一方、PGX製の炉心側部固定反射体ブロックは、炉心を取り囲むように配置され、その外側には鋼構造物の炉心拘束機構及び原子炉圧力容器がある。ここで、遮蔽計算においては、炉心部で発生した中性子及びガンマ線は、固定反射体内で急激に低下するが、その外周部では、PGX黒鉛材中の不純物が中性子を捕獲してどの程度ガンマ線を生成するか押さえておく必要がある。このため、炉心側部の固定反射体ブロックのPGX材に対しては放射化性不純物検査を行う。

(3) 機械的強度検査

機械的強度検査としては、設計で用いている基準強さを保証するために、引張強さ及び圧縮強さの強度試験を行う。

2.3 PGX黒鉛

原子炉級準等方性黒鉛PGX黒鉛は、固定反射体ブロック、高温プレナムブロック等の大型の炉心支持黒鉛構造物及びプレナム側部ブロックに使用する。これらPGX黒鉛の材料検査は、不純物検査の一部を除きIG-110黒鉛と同じ考えで行う。

不純物検査とし灰分を検査すると共に、炉心側部の固定反射体ブロックに対しては遮蔽設計を保証するために放射化性不純物検査を行う。ここで、放射化性不純物検査を行う理由は、2.2節に記載したとおりである。

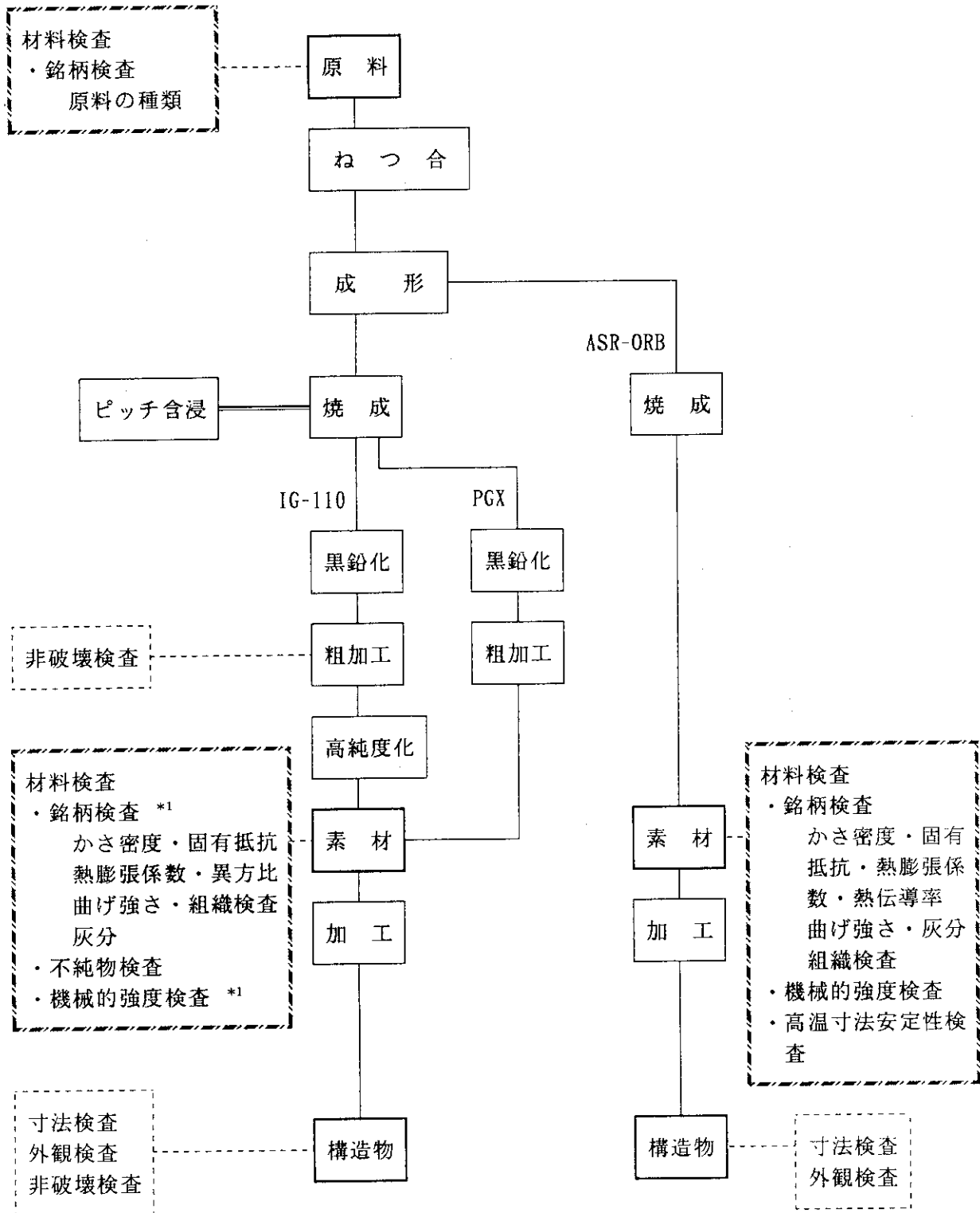
2.4 ASR-ORB炭素

ASR-ORB炭素は、炉床部断熱層の炭素ブロックに使用する。ASR-ORB炭素の材料検査は、一部検査項目が異なるがIG-110黒鉛と同じ考えで行う。鉻柄検査、不純物検査（灰分のみ）及び機械的強度検査に加えて、その安全機能上の重要性から高温寸法安定性検査を実施する⁽²⁾。

第2.1表 IG-110黒鉛の高純度化前後の特性変化

(単位：かさ密度:g/cm³、固有抵抗:μΩcm、強さ:kg/cm²、熱膨張係数:10⁻⁶/K)

LOT NO.	項目	高純度化前			高純度化後			有意差検定	
		試料数	平均	標準偏差	試料数	平均	標準偏差	危険率5%	危険率1%
高純度Lot No.1 素材Lot 0-8-64	かさ密度	10	1.783	0.004	10	1.782	0.006	有意	無し
	固有抵抗	10	1079	19	10	1067	19	有意	無し
	曲げ強さ	10	412	18.1	10	402	18.0	有意	無し
	圧縮強さ	10	861	29.6	10	860	20.0	有意	無し
	引張強さ	5	293	13.7	5	294	8.2	有意	無し
	熱膨張係数	4	3.78	0.10	4	3.83	0.05	有意	無し
高純度Lot No.2 素材Lot 0-8-66	かさ密度	10	1.783	0.004	10	1.779	0.004	有意	無し
	固有抵抗	10	999	19	10	989	22	有意	無し
	曲げ強さ	10	400	10.9	10	391	10.8	有意	無し
	圧縮強さ	10	819	15.2	10	818	17.5	有意	無し
	引張強さ	5	293	7.0	5	288	6.4	有意	無し
	熱膨張係数	4	3.50	0.08	4	3.53	0.05	有意	無し
高純度Lot No.3 素材Lot 0-8-72	かさ密度	10	1.773	0.003	10	1.769	0.005	有意	無し
	固有抵抗	10	1063	20	10	1058	17	有意	無し
	曲げ強さ	10	403	13.5	10	396	11.0	有意	無し
	圧縮強さ	10	836	15.1	10	835	17.8	有意	無し
	引張強さ	5	287	9.8	5	278	6.5	有意	無し
	熱膨張係数	4	3.78	0.05	4	3.78	0.05	有意	無し



* 1) 高純度化を施すIG-110黒鉛については、灰分を除く銘柄検査及び機械的強度検査について、あらかじめ高純度化前後でその特性に差がないことが示されれば、粗加工の段階で実施してもよい。

第2.1図 黒鉛及び炭素構造物の製造工程と各検査項目のサンプリング時期の関係⁽²⁾

3. 検査方法

3.1 銘柄検査

銘柄検査は、検査の主旨より、製造メーカーが従来から実施している検査方法にて実施する。

3.2 不純物検査

不純物検査としては、灰分と炉心側部の固定反射体を対象とした放射化性不純物検査がある。

灰分は、銘柄検査で実施した灰分の検査成績を確認することとする。

PGX黒鉛の放射化性不純物の検査において、4.2節で述べるようにCo当量換算で判定する場合は、試料を化学分析して各元素の含有割合を測定する。化学分析法自体は特殊なものでないことから、スパークイオン源質量分析法等一般的な方法でよいと考えられる。

3.3 機械的強度検査

機械的強度検査である引張強度及び圧縮強度試験は、HTTRに使用する黒鉛及び炭素が国内、米国及びドイツで製造される現状では、各国の黒鉛材料等に適用される実績のある規格に基づいて行うことは妥当と考えられる。具体的には、国内においてはJIS規格、米国ではASTM規格及びドイツではDIN規格である。しかしながら、これらの規格は原子炉用黒鉛材料を必ずしも念頭においていない。このため、これらの規格から逸脱する項目があったとしても、その理由が明確であれば、強度検査はこれらの規格に縛られることはないと考えられる。以下、技術的観点から変更可能な主要項目とその範囲を検討する。

(1) 試験片形状

黒鉛材料の強度は、強度部材の寸法が粒径の大きさに近づくと従い、寸法効果（粒径効果）により著しく低下する。第3.1図に黒鉛材料の引張強さに及ぼす試験片の寸法効果を示す⁽⁵⁾。この図より、機械的強度検査に用いる試験片の荷重支持部の最小寸法が最大粒径の10倍以上であれば、試験片の形状は素材からの材料取り及び従来からの試験経験等を踏まえて任意に決められる。

圧縮試験片については、アスペクト比（円柱試験片なら：高さ/直径）が強度に影響を与え、アスペクト比が大きくなると短柱の座屈挙動を示す⁽⁶⁾。このため、

IG-110黒鉛を用いて強度に与えるアスペクト比の影響を検討した。その結果を第3.1表に示す。表より、アスペクト比が1と2の場合では、アスペクト比が異なっても圧縮強度はほぼ同じであり、危険率5%の有意差検定においても両者の有意差は認められない。このことより、圧縮試験片の形状は、アスペクト比が1から2程度であれば自由に決められる。なお、試験片形状がこの範囲を越える場合は、アスペクト比が強度に与える影響を評価すべきである。

(2) 負荷速度

黒鉛材料の強度は、一般に負荷速度、即ちひずみ速度に影響されると言われている。このため、IG-110黒鉛とPGX黒鉛に対してひずみ速度が強度に与える影響を調べている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。引張強さについては、ひずみ速度が 10^{-2} (1/s)以下であれば強度への影響はない。一方、圧縮強さについては、ひずみ速度が10(1/s)を超えると強度は急激に低下するものの、これ以下では強度への影響は僅かである。従って、試験時の負荷速度は引張と圧縮で、ひずみ速度換算で 10^{-2} (1/s)及び1(1/s)以下とする。

また、黒鉛材料の応力・ひずみ曲線はほぼ直線的で破断ひずみも小さく(IG-110黒鉛の引張破断ひずみは約0.5%程度である。)あまり変形しない。このため、ひずみ又は荷重制御の負荷方式の違いによる、強度への影響はないと考えられる。

3.4 高温寸法安定性検査

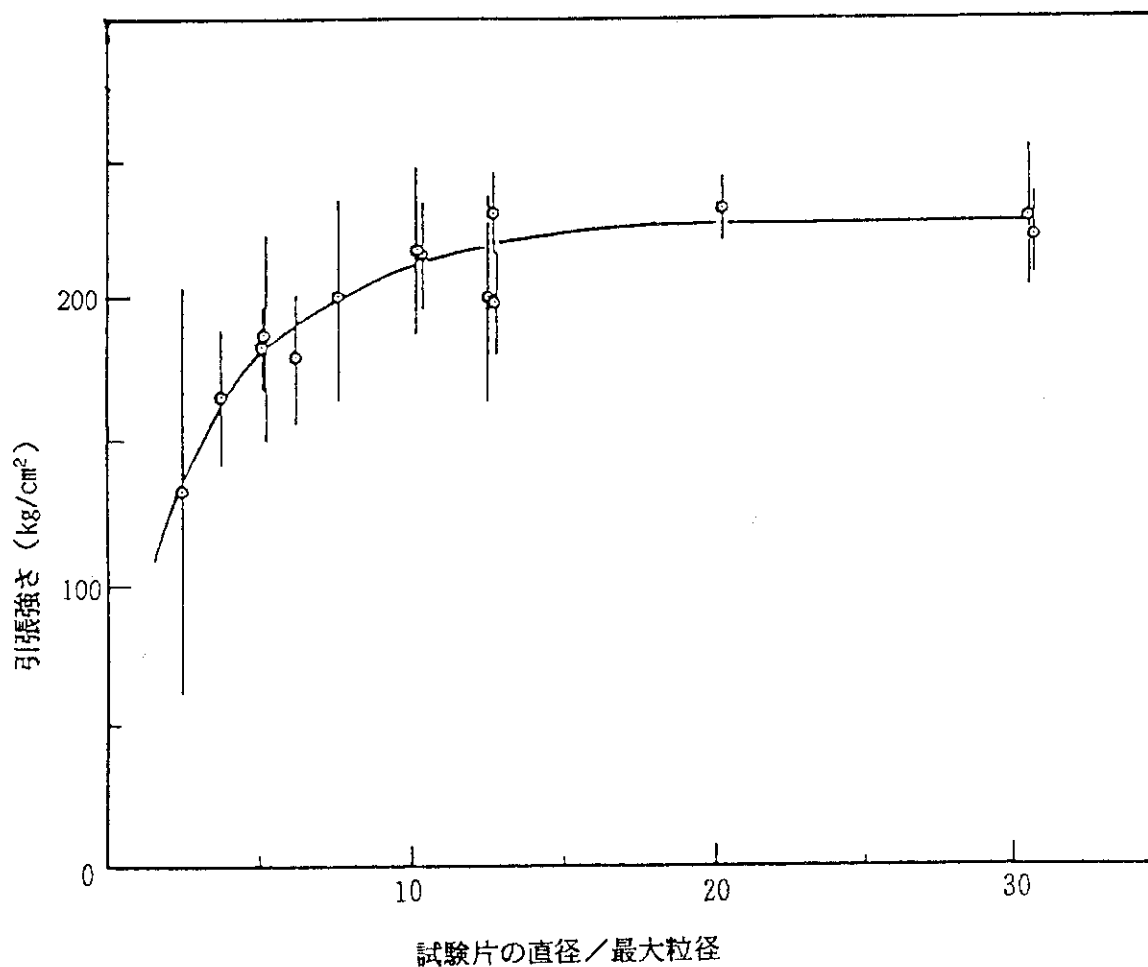
ASR-ORB炭素に対して行う高温寸法安定性検査は、炭素材料の焼成温度が実際の使用温度より十分高く、供用中に寸法変化を引起こさないことを確認するために行うもので、その1つとして熱膨張係数を測定することで焼成温度が確認できる⁽²⁾。

高温寸法安定性検査における熱膨張係数の測定は、銘柄検査の熱膨張係数検査と同じ測定方法(試験片、試験装置等)で問題ないが、測定温度がASR-ORB炭素の設計上の最高温度(900℃)を上回り、焼成温度近傍の~1150℃まで行える試験装置であればよい。

第3.1表 圧縮強度に与えるアスペクト比の影響

アスペクト比	1	2
試験片寸法 (mm)	10x10x10	10x10x20
圧縮強度 (kg/cm ²)	813.5 ± 24.3*	802.8 ± 26.0

* : 平均 ± 標準偏差を示す。



第3.1図 黒鉛材料の引張強さに及ぼす試験片の寸法効果
 (IM1-24黒鉛：原子炉級等方性黒鉛，最大粒径約1mm)

4. 判定基準

4.1 銘柄検査

銘柄検査は、製造工程に異常が無いことを確認するために行う。黒鉛材の銘柄は、各製造メーカーが独自に開発したものであるので、製造メーカーの銘柄保証値をそのまま判定基準とする。IG-110黒鉛、PGX黒鉛及びASR-ORB炭素の製造メーカーの銘柄保証値を第4.1表から第4.3表に示す。

4.2 不純物検査

PGX黒鉛材料に対して行う放射化性不純物検査については、判定値の目安値として第4.4表に示す元素を制限している⁽²⁾。

しかしながら、この目安値を超える元素があったからといって、ただちに遮へい設計に支障を生じるものではない。そこで、黒鉛検査基準では、不純物の分析値が上表の数値を超えた場合には、別途遮へい上問題のないことを示すこととしている。この“遮へい上問題のないこと”に対応する具体的な判定基準を、以下に示す理由により不純物のC o当量合計が5 ppm 以下とした。

遮へい評価では、炉心側部の固定反射体に含まれる不純物の放射化線源をCoで代表しているので、この評価に直結する測定値としては、不純物各元素の分析値を線量当量率換算で等価なC o量とするのが妥当である。各元素のC o当量への換算係数を第4.5表に示す。

ここで、炉運転時の遮へい設計に基づけば、オペフロ線量当量率への寄与が遮へい設計上無視出来る $0.01 \mu\text{Sv/h}$ 以下に相当するPGX黒鉛中の放射化不純物量は ^{60}Co に換算して約1000ppmである。従って、本来放射化性不純物検査はこの値に基づいて判定すればよいのであるが1000ppmという値はC o当量に対する制限としては大きすぎて現実的ではないことと、被曝線量を合理的に達成出来る限り低くするというALARAの精神を尊重して、従来PGX黒鉛に対する分析実績より現実的な上限値としてC o当量合計で5 ppm と設定した。

4.3 機械的強度検査

(1) 判定方法

強度設計は「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」⁽¹⁾に基づいて行う。この設計方針において黒鉛構造物は、その材料について設定された引張及び圧縮の

基準強さ (S_u) が確保されていれば、構造健全性に問題は生じないように強度設計を行うよう規定されている。また、受入れ試験で行う機械的強度検査は黒鉛検査基準では以下のように定められている⁽²⁾。

$$X \geq S_u + (k_1 + k_2 / \sqrt{n}) \sigma \quad (4.1)$$

ここで、 X : 受入れ試験により得られる平均強さ

S_u : 基準強さ

k₁ : 材料の99%がS_u値を保証するものに相当(=2.326)

k₂ : サンプルングによる誤差を考慮し、片側95%信頼度に相当
(=1.645)

n : 検査個数

引張試験では n ≥ 4 / 検査ログ(1ログ単位で判定する場合)

n ≥ 20 / 検査ロット(1ロット単位で判定する場合)

圧縮試験では n ≥ 2 / 検査ログ(1ログ単位で判定する場合)

n ≥ 10 / 検査ロット(1ロット単位で判定する場合)

σ : 検査単位によって定まる標準偏差(原則的には、あらかじめ別途実施した試験により定める。但し、それが困難な場合は受け入れ試験時に定めてもよい。)

(2) 標準偏差

機械的強度検査の判定に用いる標準偏差は、検査単位として1ロット単位で判定する場合と1ログ単位で判定する場合で別の値を設定する。

1ログ単位で判定する場合の標準偏差は、次式で求める。

$$\sigma^2_{\log} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{1}{(n_{ij}-1)} \sum_{k=1}^{n_{ij}} (X_{ijk} - X_{ij})^2 \quad (4.2)$$

一方、1ロット単位で判定する場合の標準偏差は、次式で求める。

$$\sigma^2_{\text{lot}} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{n_{ij}} (X_{ijk} - X_i)^2 \quad (4.3)$$

ここで、 L : 検査ロット

m_i : 検査ロット i に含まれるログ数

n_{ij} : 検査ロット i のログ j の試験片数

n_i : 検査ロット i の全試験片数

- X_{ij} : 検査ロット i のログ j の試験片測定値の平均
 X_i : 検査ロット i の全試験片測定値の平均
 X_{ijk} : 検査ロット i のログ j の k 番目の試験片測定値

IG-110黒鉛の機械的強度検査は、1ロット単位で判定する場合と1ログで判定する場合がある。標準偏差は、第4.6表に示すように、最近製造されたIG-110黒鉛の複数ロット、複数ログから切出した合計60個以上の試験片の測定データより(4.2)式及び(4.3)式に基づいて算出した。得られた標準偏差は、以下の通りである。

(i) 1ロット単位で判定する場合

$$\text{引張強さ } \sigma = 13.7 \text{ kg/cm}^2, \quad \text{圧縮強さ } \sigma = 26.6 \text{ kg/cm}^2$$

(ii) 1ログ単位で判定する場合

$$\text{引張強さ } \sigma = 12.9 \text{ kg/cm}^2, \quad \text{圧縮強さ } \sigma = 20.2 \text{ kg/cm}^2$$

PGX黒鉛の機械的強度検査は、1ログ単位で判定する。標準偏差は、第4.7表に示すように、最近製造されたPGX黒鉛の複数ログから切出した合計90個以上の試験片の測定データより(4.2)式に基づいて算出した。得られた標準偏差は、以下の通りである。

$$\text{引張強さ } \sigma = 7.74 \text{ kg/cm}^2, \quad \text{圧縮強さ } \sigma = 13.6 \text{ kg/cm}^2$$

ASR-ORB炭素の機械的強度検査は、1ログ単位で判定する。標準偏差は、受入れ試験データより(4.2)式に基づいて算出する。

(3) 試験片採取位置

PGX黒鉛及びASR-ORB炭素材では、ログの最弱位置に高応力が発生する場合、試験片は最弱位置から採取するか、それが出来なければ適切な補正を施す必要があるとしている⁽²⁾。

PGX黒鉛は、従来より、大型成形品(φ55×72"等)ではログの中心部分の強度が若干低下する傾向があり、中型成形品(φ45×42"等)では有意なログ内強度分布は見られないことが知られている。このため、HTTRで使用する素材と同程度の成形品2種類について、ログ内強度分布を調べた。第4.8表に大型成形品、第4.9表に中型成形品に対する試験結果を示す。表より、大型成形品については、ログ中心部で引張強さが僅かに低下する程度で、中型成形品ではログ内の強度分布は認められない。また、大型成形品から材料取りする場合は、ログ中心部に高応力が発生しないよう設計対応していると共に、ログ中心部に高応力が発生する構造物に対しては、ログ内強度分布が認められない中型成形品より材料取りを計画している。

ASR-ORB炭素は、振動充てん法による成形品であり、従来実績からログ内に有意な強度分布は生じないことが確認されているので、とくに試験片位置に配慮する必要はない。参考として、第4.10表に同様の振動充てん法による成形を

行った黒鉛品について物性値のログ内分布を測定した例を示すが、曲げ強さで見
る限り有意な強度分布は見られない。

以上のことより、PGX黒鉛及びASR-ORB炭素の素材から採取する試験片は、ログ
中心部から採取しなくとも、強度の補正を施す必要はない。

4.4 高温寸法安定性検査

高温寸法安定性検査は、炉床部断熱層の炭素ブロックに使用するASR-ORB炭素に
対して実施する。

高温寸法安定性検査の目的は、炭素ブロックが焼成温度に近い高温にさらされ
る環境下で寸法的に安定していることを確認することである。設計における炭素
ブロックの最高温度は、最も高温となる高温試験運転時において、プレナム下部
ブロックに接する上端部で約900°C程度となる⁽²⁾。

一般に炭素材料は、焼成温度を越えると炭化が進行し、熱膨張の伸びが急激に
減少する。第4.1図は炭素材料の熱膨張の測定結果を示す⁽⁹⁾。図より、EG-36B炭
素は800°C近傍で急激に熱膨張の伸びが減少している。ASR-ORB炭素について試験
片の伸を測定した結果を第4.2図に示す。ASR-ORB炭素の測定例では1050°C以下で
伸びの減少は観察されていない。

高温寸法安定性検査の判定基準としては、第4.1図のEG-36B炭素が示すような急
激な熱膨張の伸びの減少が起こらない限り合格とする。

第4.1表 HTTRに使用するIG-110黒鉛の銘柄保証値

No.	項目	銘柄保証値
1	原料コークスの種類 及び粒径の範囲	原料コークスの種類 : 石油系コークス 原料コークスの粒径の範囲; 176 μm 未満が98%以上
2	かさ密度* ¹	1.74 g/cm ³ 以上(ロット平均又は σ 平均)
3	固有抵抗* ²	1300 $\mu\Omega\text{cm}$ 以下(ロット平均又は σ 平均)
4	熱膨張係数* ² (室温~400 $^{\circ}\text{C}$)	3.4 $\times 10^{-6}$ / $^{\circ}\text{C}$ 以上, (ロット平均又は σ 平均) 4.6 $\times 10^{-6}$ / $^{\circ}\text{C}$ 以下
5	灰分* ³	100重量ppm 以下(ロット平均又は σ)
6	曲げ強さ* ²	320 kg/cm ² 以上(ロット平均又は σ 平均)
7	組織検査* ³	組織上の特徴である針状の粒子が見られ、 見本と著しく異なること
8	異方比* ⁴	1.15 以下 (ロット平均又は σ 平均)

*1 : 本試験検査は、高純度化前にて実施。

*2 : 本試験検査は、高純度化前にて実施。

又、試験片の採取方向は、径方向(軸方向に対して垂直方向)とする。

*3 : 本試験検査は、高純度化後にて実施。

*4 : 異方比は、軸方向の固有抵抗の平均値と径方向の固有抵抗の平均値の比とする。

第4.2表 HTTRに使用するPGX黒鉛の銘柄保証値

No.	項目	銘柄保証値
1	原料コークスの種類 及び粒径の範囲	原料コークスの種類 : 石油系コークス 原料コークスの粒径の範囲: 粒子: 3/1.5mesh(W S Tyler 製)で70%以上保持 粉末: 200mesh(W S Tyler 製)で40%-50% 通過
2	かさ密度	1.68 g/cm ³ 以上(σ 平均)
3	固有抵抗	1550 $\mu\Omega\text{cm}$ 以下(σ 平均)
4	熱膨張係数 (室温~400 $^{\circ}\text{C}$)	1.4 $\times 10^{-6}$ / $^{\circ}\text{C}$ 以上, (ロット平均又は σ 平均) 3.5 $\times 10^{-6}$ / $^{\circ}\text{C}$ 以下
5	灰分	7000 重量ppm 以下(σ 平均)
6	曲げ強さ	70 kg/cm ² 以上(σ 平均)
7	組織検査	組織上の特徴が見本と著しく異なること
8	異方比* ¹	1.5 以下 (ロット平均又は σ 平均)

*1 : 異方比は、軸方向の固有抵抗の平均値と径方向の固有抵抗の平均値の比とする。

第4.3表 HTTRに使用するASR-ORB炭素の銘柄保証値

No.	項目	銘柄保証値
1	原料コークスの種類 及び粒径の範囲	原料コークスの種類 : 石炭系コークス 原料コークスの粒径の範囲: 最大粒径 1mm以下
2	かさ密度	1.62 g/cm ³ 以上 (平均)
3	固有抵抗	3000 $\mu\Omega$ cm以上, (平均) 4500 $\mu\Omega$ cm以下
4	熱膨張係数 (室温~1000℃)	6.5×10 ⁻⁶ /℃以下 (平均)
5	灰分	5000 重量ppm 以下 (平均)
6	曲げ強さ*1	120 kg/cm ² 以上 (平均)
7	組織検査	組織上の特徴が見本と著しく異なること
8	熱伝導率 (室温)	8.1 kcal/mh℃以下 (平均)

*1 試験片の採取方向は、径方向とする。

第4.4表 PGX黒鉛の不純物目安値⁽²⁾

元素	重量ppm
Si	380
Fe	370
Al	35
Ni	80
V	130
Ca	160
Li	0.05

注) 上記数値を超えた場合には、別途
遮へい上問題ないことを示すこと。

第4.5表 Co当量への換算係数

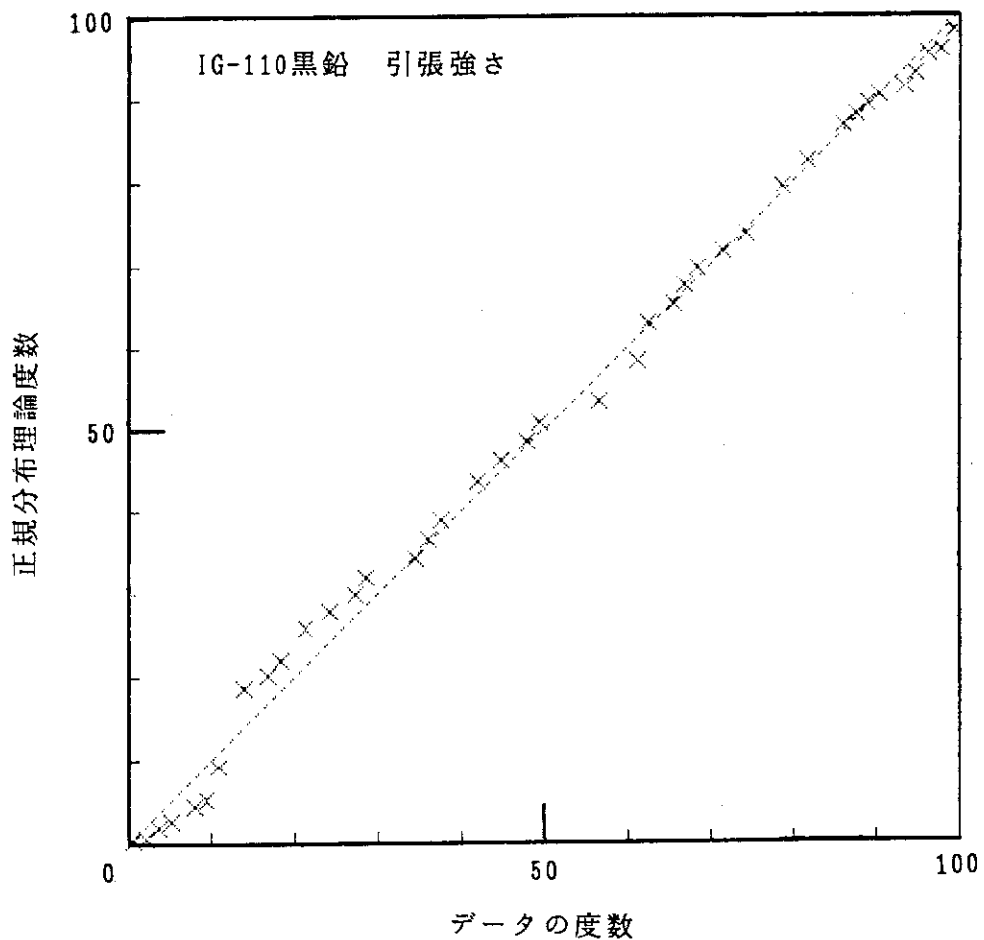
(4400日照射後10日冷却の線量率にて換算)

元 素	換算係数
C o	1.0
B	N
A g	0.026
A l	N
A u	0.021
C a	2.9×10^{-6}
C r	8.8×10^{-5}
C s	0.44
C u	2.2×10^{-5}
E u	6.1
F e	8.8×10^{-5}
H f	0.011
H g	0.0019
L i	N
M g	N
M n	N
N i	2.4×10^{-5}
P b	N
S c	0.97
S i	N
S n	1.9×10^{-5}
T a	0.96
T i	6.2×10^{-5}
V	N

N ; negligible

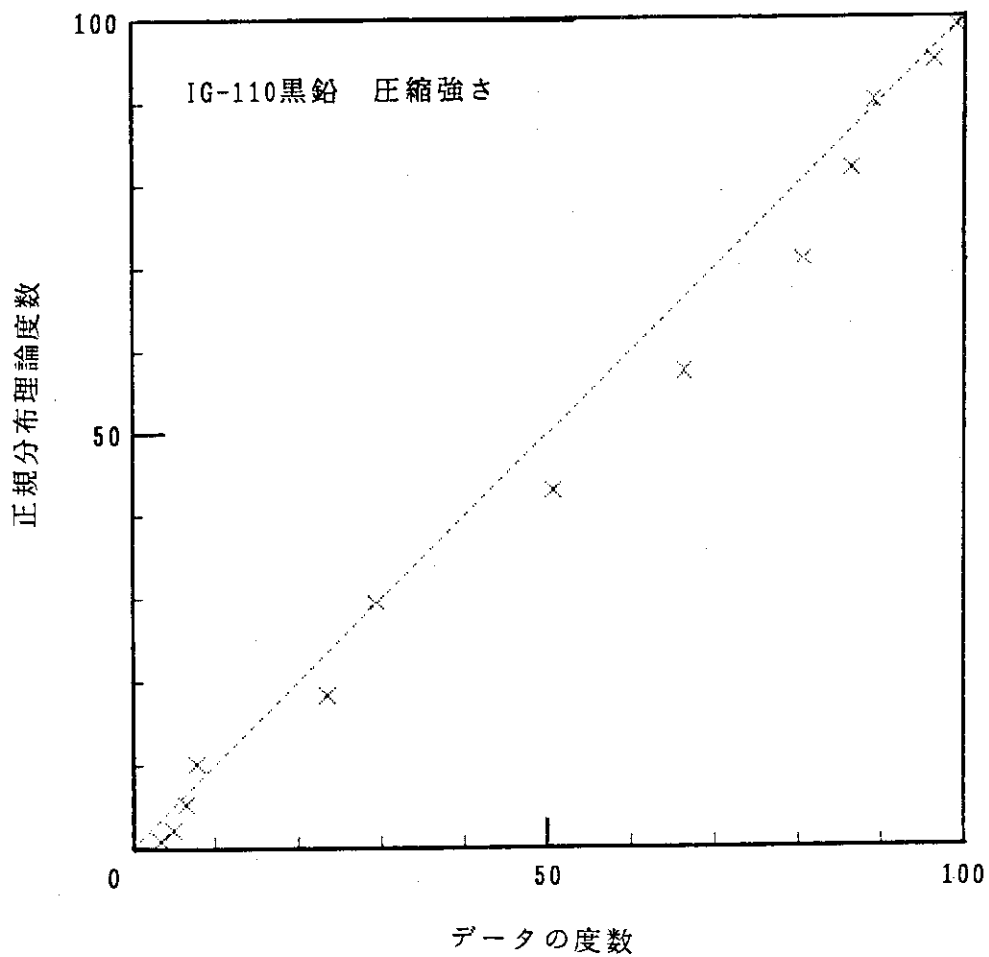
第4.6表 IG-110黒鉛の強度試験結果と標準偏差 (1/2)

	引張強さ
ロット数	6 ロット
各ロット内のログ数	1ログ(1ロット), 2ログ(2ロット), 3ログ(3ロット)
各ログ内の試験片数	5 本 (2ログ毎 4本)
合計試験片数	68 本
平均強さ	312 kg/cm ²
ログ内標準偏差 σ_{LOG}	12.9 kg/cm ²
ロット内標準偏差 σ_{LOT}	13.7 kg/cm ²



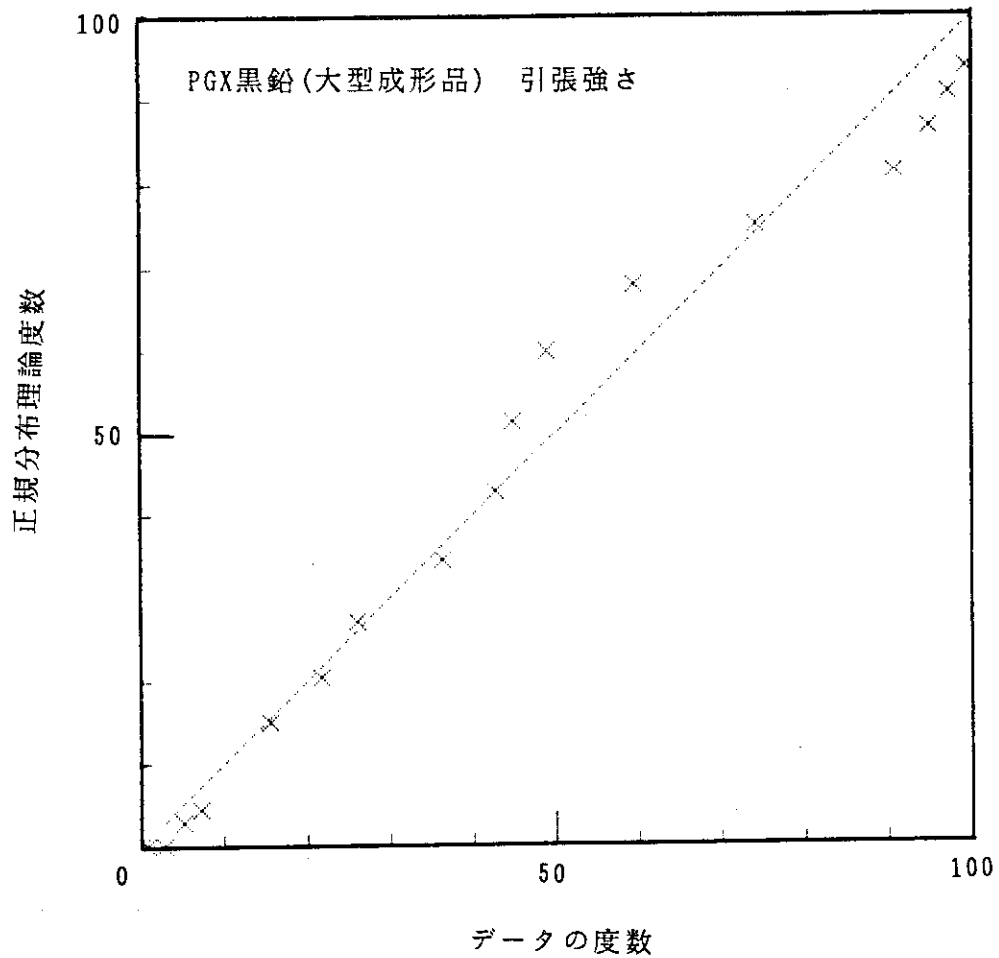
第4.6表 IG-110黒鉛の強度試験結果と標準偏差 (2/2)

		圧縮強さ
ロット数		6 ロット
各ロット内のログ数		1ログ(1ロット), 2ログ(2ロット), 3ログ(3ロット)
各ログ内の試験片数		5 本
合計試験片数		70 本
平均強さ		844 kg/cm ²
ログ内標準偏差 σ_{LOG}		20.2 kg/cm ²
ロット内標準偏差 σ_{LOT}		26.6 kg/cm ²



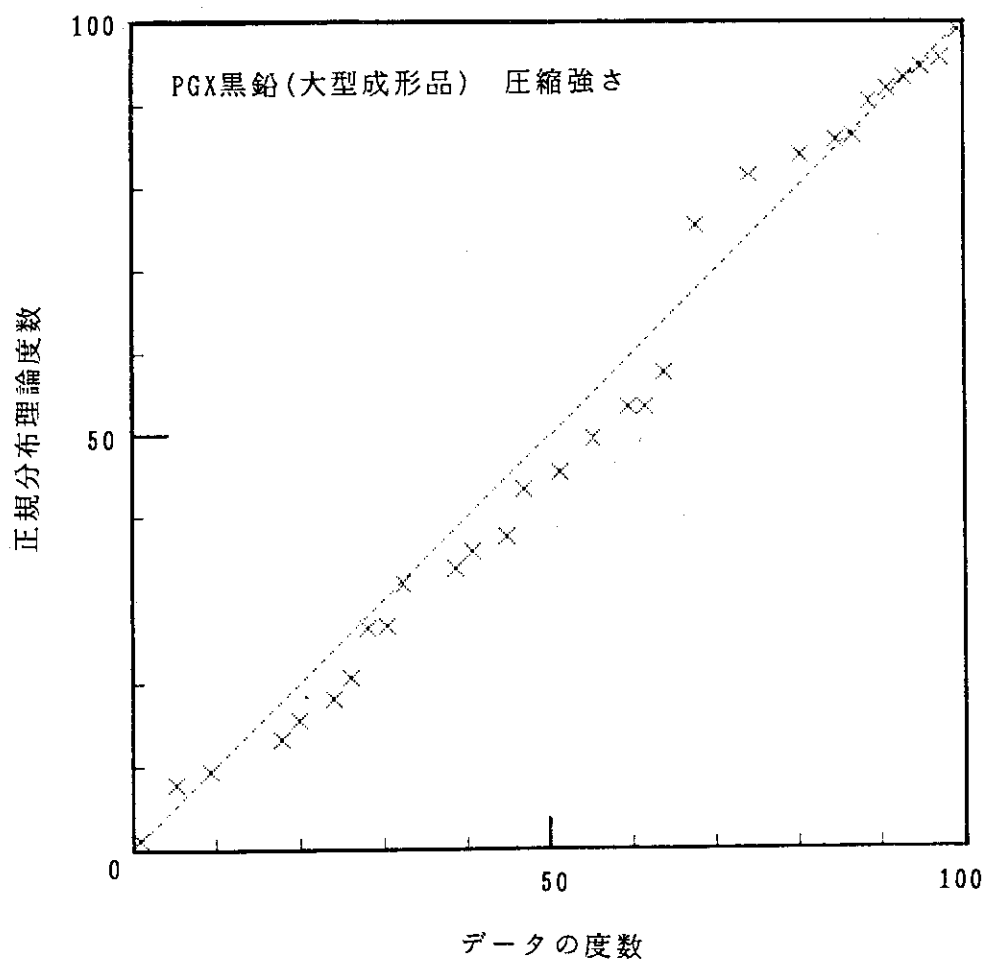
第4.7表 PGX黒鉛の強度試験結果と標準偏差 (1/2)

	引張強さ
ロット数	4 ロット
各ロット内のログ数	1 ログ
各ログ内の試験片数	24 本
合計試験片数	96 本
平均強さ	87.6 kg/cm ²
ログ内標準偏差 σ_{LOG}	7.74 kg/cm ²



第4.7表 PGX黒鉛の強度試験結果と標準偏差 (2/2)

圧縮強さ	
ロット数	4 ロット
各ロット内のログ数	1 ログ
各ログ内の試験片数	24 本
合計試験片数	96 本
平均強さ	334 kg/cm ²
ログ内標準偏差 σ_{LOG}	13.6 kg/cm ²



第4.8表 PGX黒鉛（大型成形品）のログ内強度分布の測定例

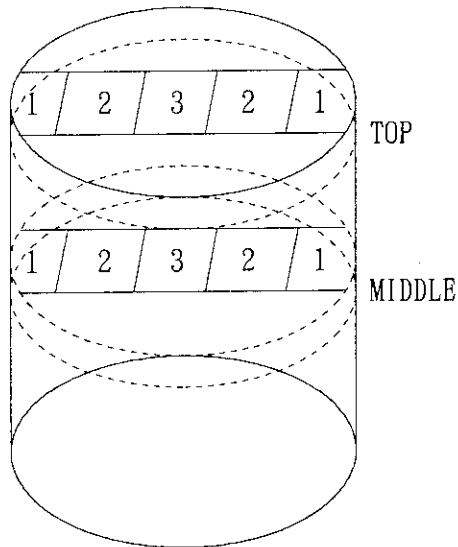
強 度	試 験 片 採 取 位 置					
	TOP			MIDDLE		
	1	2	3	1	2	3
引張強さ N/mm ²	8.3	8.3	8.2	8.4	7.4	6.7
圧縮強さ N/mm ²	27.4	27.6	29.0	31.1	29.1	27.1

数値は複数(12 個以上)の試験片についての測定値を平均した値。

— 試験片採取位置図 —

LOG SIZE :

φ55×72"



第4.9表 PGX黒鉛（中型成形品）のログ内強度分布の測定例

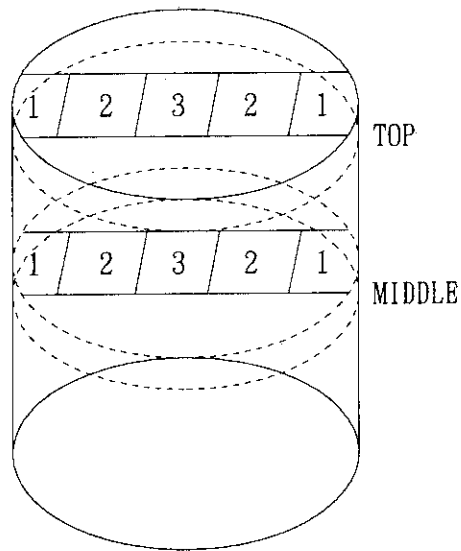
強 度	試 験 片 採 取 位 置					
	TOP			MIDDLE		
	1	2	3	1	2	3
引張強さ N/mm ²	11.9	11.5	10.7	11.5	11.4	10.2
圧縮強さ N/mm ²	42.4	41.9	37.4	42.9	41.1	39.5

数値は複数(12 個以上)の試験片についての測定値を平均した値。

— 試験片採取位置図 —

LOG SIZE :

φ45×42"



第4.10表 振動充てん法による成形品の物性値のログ内分布測定例

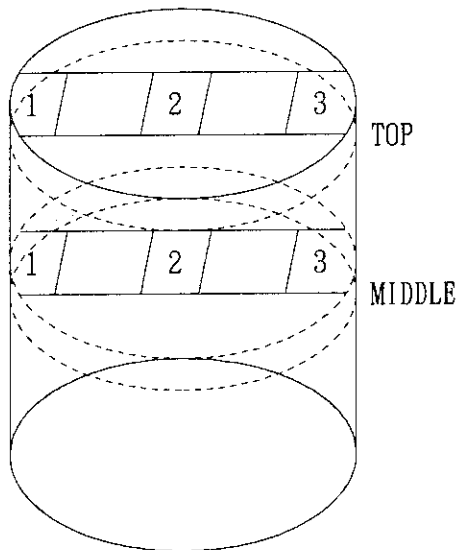
物性値	試験片採取位置					
	TOP			MIDDLE		
	1	2	3	1	2	3
かさ密度 g/cm ³	1.67	1.68	1.68	1.69	1.69	1.67
固有抵抗 μΩm	10.7	10.5	10.4	10.5	10.9	10.8
曲げ強さ N/mm ²	9.3	9.4	9.2	10.4	9.1	10.3

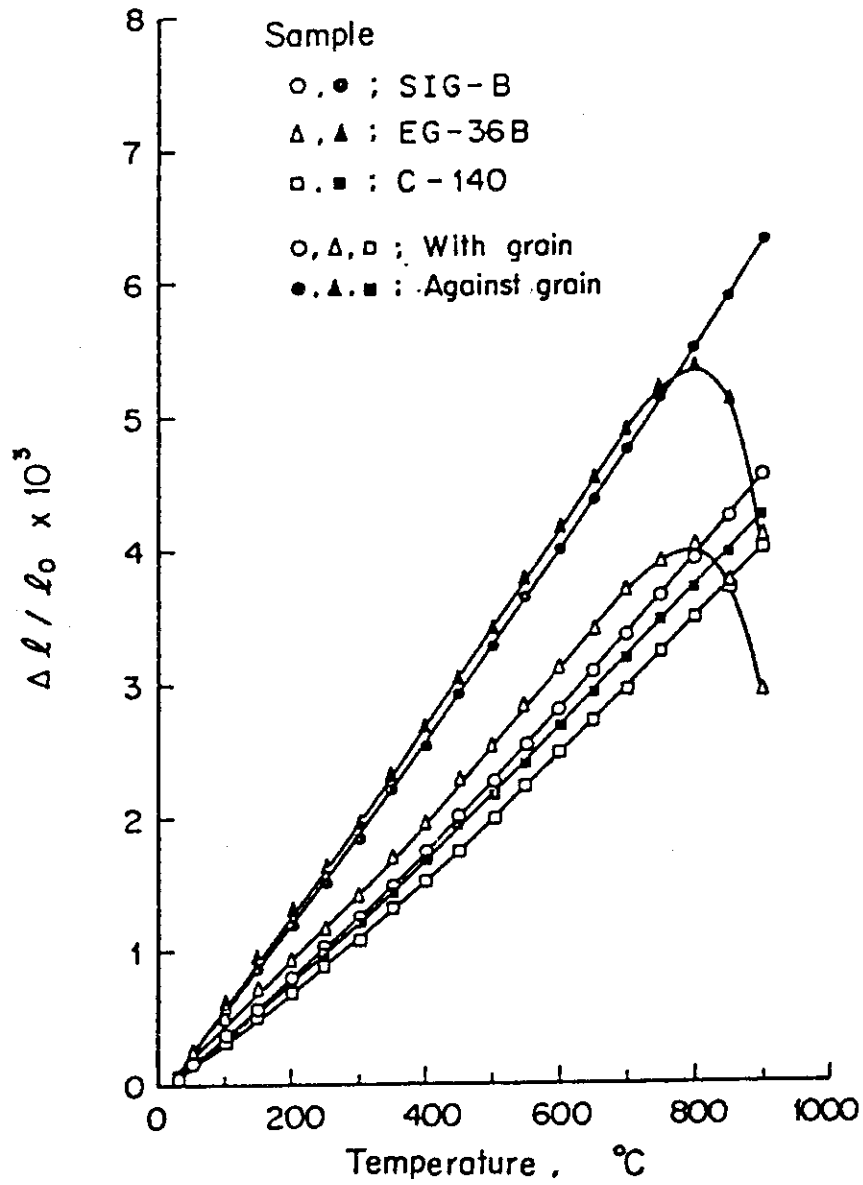
測定した材料は ASR-ORB炭素ではなく、同様に振動充てん法により成形された黒鉛品である。

— 試験片採取位置図 —

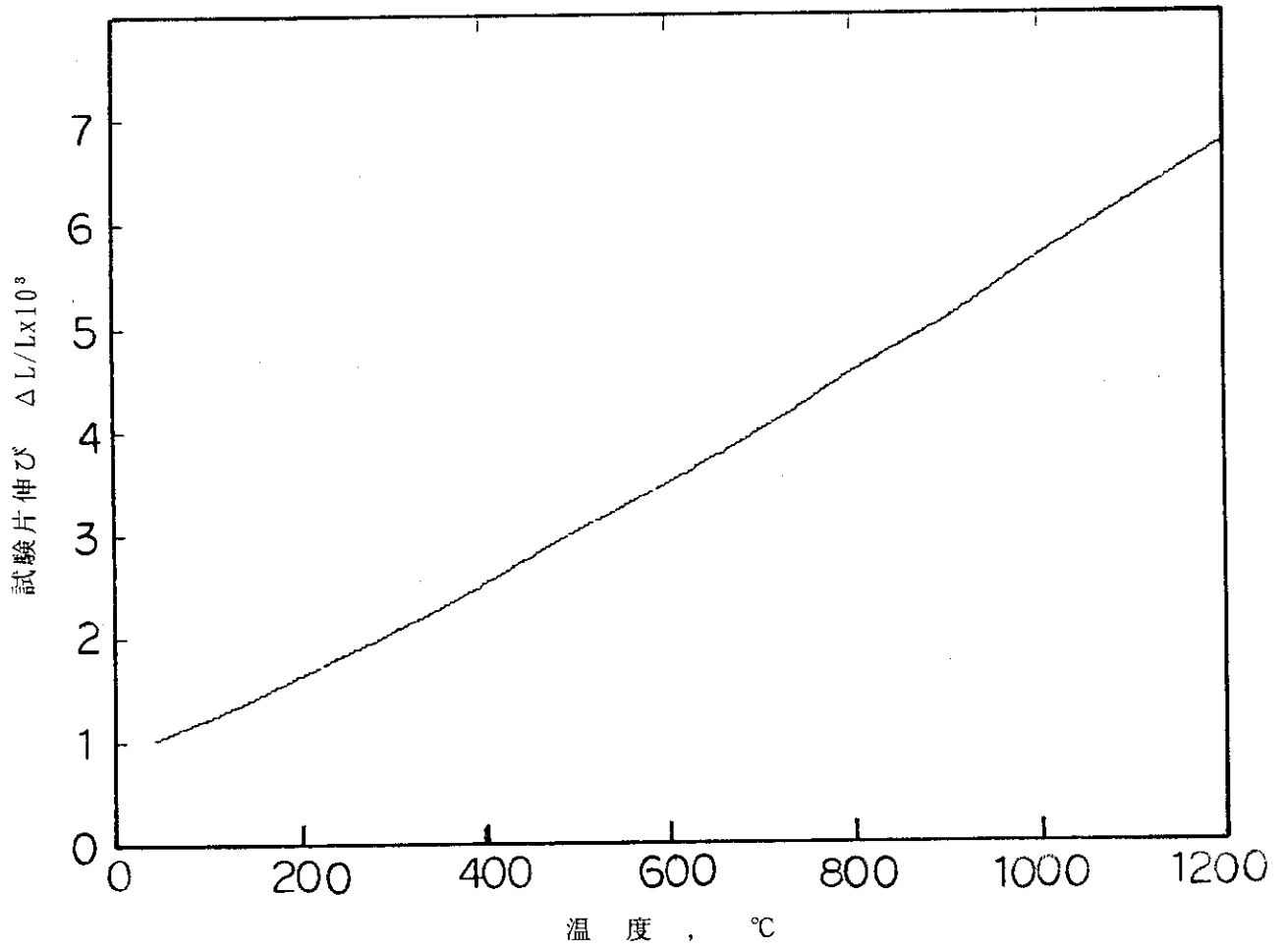
LOG SIZE :

φ1180×580mm





第4.1図 炭素材料の熱膨張測定例⁽⁹⁾



昇温速度：5°C/min、雰囲気：Ar中

第4.2図 ASR-ORB炭素の熱膨張測定例

5. おわりに

本検討により、黒鉛検査基準のうちの材料検査に関する検査方法及び判定基準を明確にすることができた。本材料検査基準に関しては、H T T Rで使用する黒鉛及び炭素材料について、試験データを体系的に調査・分析すると共に、製造メーカーに問い合わせた最新の製造実績を考慮して検討した。更に、H T T Rの設計の詳細化により、従来核設計及び遮蔽設計で目安としていた不純物検査を、遮蔽計算等に基づいて検討した。その結果、炉心黒鉛構造物の黒鉛素材に対しては、ほう素当量及び放射化性不純物の検査は、安全上の観点から行う必要がないことを明らかにした。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部 斎藤 伸三部長及び 田中 利幸 次長、高温工学部高温材料強度研究室 衛藤 基邦 室長並びに関係各位に深謝致します。

5. おわりに

本検討により、黒鉛検査基準のうちの材料検査に関する検査方法及び判定基準を明確にすることができた。本材料検査基準に関しては、H T T Rで使用する黒鉛及び炭素材料について、試験データを体系的に調査・分析すると共に、製造メーカーに問い合わせた最新の製造実績を考慮して検討した。更に、H T T Rの設計の詳細化により、従来核設計及び遮蔽設計で目安としていた不純物検査を、遮蔽計算等に基づいて検討した。その結果、炉心黒鉛構造物の黒鉛素材に対しては、ほう素当量及び放射化性不純物の検査は、安全上の観点から行う必要がないことを明らかにした。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部 斎藤 伸三部長及び 田中 利幸 次長、高温工学部高温材料強度研究室 衛藤 基邦 室長並びに関係各位に深謝致します。

参 考 文 献

- (1) 高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989).
- (2) 豊田 純二、伊与久 達夫、石原 正博、多喜川 昇、塩沢 周策：高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準、JAERI-M 91-102(1991).
- (3) JISハンドブック品質管理：JIS Z 9042~53, 日本規格協会(1987).
- (4) 山下 清信、私信.
- (5) J.E.Brocklehurst:Fracture in Polycrystalline graphite, TRG 2731(1975).
- (6) 鶴戸口 英善、川田 雄一、倉西 正嗣 共著：材料力学 上巻、裳華房.
- (7) H.Ugachi, S.Ishiyama, M.Eto and M.Ishihara:Fracture Behavior of Nuclear Graphite under Compressive and Tensile Impact Loading, MATERIAL FOR HIGH PERFORMANCE;Processing Properties and Applications of Metallic and Ceramic Materias,IRC 92.
H.Ugachi, S.Ishiyama, M.Eto and M.Ishihara:Fracture Behavior of Nuclear Graphite under Compressive Impact Loading,Proc. 12th Conf. on Carbon, June 23-28,1991, University of California, USA.
- (8) 奥 達雄、私信
- (9) 松尾 秀人、斎藤 保、福田 保昌、佐々木 泰一、JAERI-M 8561(1979).