

## 技術報告

産業用 X 線断層撮影装置の開発と  
その耐火物への応用

© 1985 ISIJ

相庭吉郎\*・沖 和男\*・中村滋男\*<sup>2</sup>・藤井正司\*<sup>2</sup>Development of Industrial X-ray Computed Tomography and  
Its Application to Refractories

Yoshiro AIBA, Kazuo OKI, Shigeo NAKAMURA and Masashi FUJII

## Synopsis :

An industrial X-ray computed tomography was developed under the influence of the rapid spread of the use of the X-ray CT scanner in the medical field and improvements of the equipment. Although current nondestructive testing machines of refractories use the ultrasonic inspection method or the X-ray fluoroscopic method, these equipments cannot produce a tomogram or cannot carry out quantitative evaluation. By using an industrial X-ray computed tomography, submerged nozzles for continuous casting of steel were analyzed with interesting results. The features of the industrial X-ray computed tomography applied for refractory nozzles are as follows:

- (1) It promptly detects interior defects.
- (2) It can measure dimensions and shapes.
- (3) It can numerically express the distribution of density.

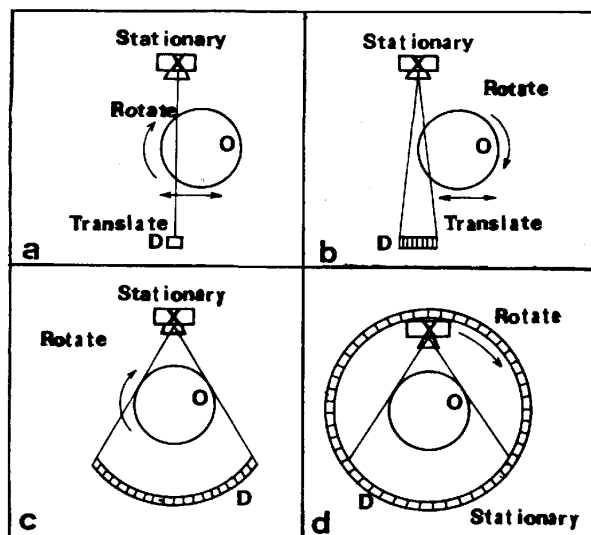
Accordingly, it is expected that the industrial X-ray computed tomography will widely be used in the fields of development and quality control of refractories and advanced ceramic materials.

## 1. 緒 言

## X線断層撮影装置 (X-ray Computed Tomography :

以下X線 CT スキャナーと記す)は 1973 年に発表されて以来<sup>1)</sup>, 各社によつて開発が行われ画質の改善や高速化が進み医療診断装置として今日, 不可欠なものという評価を得ている. 1970 年代の医療用における急速な普及と高性能化に刺激されて産業用への適用が検討されてきた<sup>2)~7)</sup>. 従来, 耐火物の品質保証, 研究開発にX線や超音波<sup>8)</sup>を利用した非破壊検査装置が活用されてきたが, いずれも定量的な情報を把握するには不十分であった. 一般的にはX線透視法<sup>9)</sup>が最も普及しオンライン検査用として多く使われているが, 能率良く処理できる反面, 三次元物体を二次元の映像としてとらえるためX線の透過方向で情報が重複する欠点を持っている. X線 CT スキャナーによる断層像は対象物を輪切りにした断面構造を画像として表現できるので三次元的に内部構造を評価できる. またX線検出器として効率やダイナミックレンジが優れたものを使用しているため, SN 比の良い高精度のデータが得られる. また階調方向の分解能が極めて優れているのも特長の一つである. 中エネルギー

CT スキャナー (TOSCANER-3200) と高エネルギー CT スキャナー (TOSCANER-4100) を用い耐火物への応用を検討し良好な結果を得たので, 連続铸造用耐火物の測定例を中心に紹介する.



O: SAMPLE X: X-RAY TUBE D: DETECTOR

a : 1st generation b : 2nd generation c : 3rd generation  
d : 4th generation

Fig. 1. Evolution of CT scanner.

昭和 59 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 2 月 12 日受付 (Received Feb. 12, 1985)

\* 東芝セラミックス(株)セラミック事業部 (Ceramic Division, Toshiba Ceramics Co., Ltd., 1 Minamifuji Ogakie-cho Kariya 448)

\*<sup>2</sup> (株)東芝 CAT 部 (CAT Division, Toshiba Corp.)

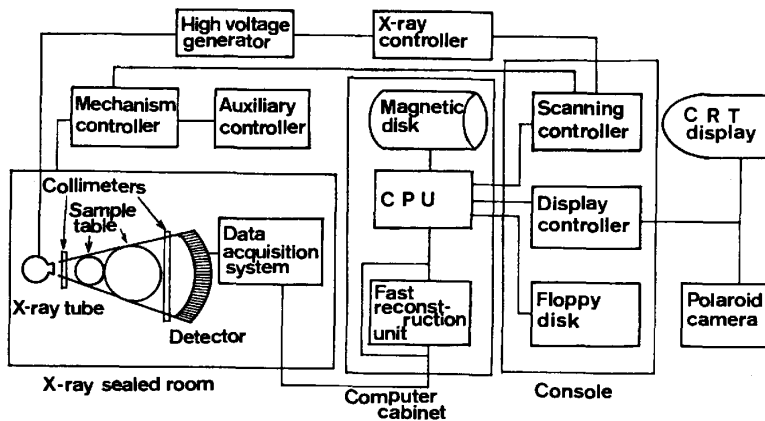


Fig. 2. Block diagram of middle-energy industrial CT scanner.

Table 1. Specifications for middle-energy CT scanner.

Scanning method	By rotating of object (3rd generation scanner)
Object material	Plastics, Rubber, Wood, Foods : Max. 300 mm
Maximum thickness	Ceramics, Refractories : 200 mm
Size and weight of object	Dimensions : Max. $\phi$ 300 mm $\times$ 600 mm (standard) Weight : Max. 100 kg/large table (standard)
Scanning time	15 s/scan
Slicing thickness	0.5, 2.0, and 5.0 mm
X-ray rating	140 kV, 300 mA, 2.0 ms pulse (standard)
Detector	High pressure Xe detector (512 channels)
Image reconstruction matrix	320 $\times$ 320
Pixel size mm	Scanning field 150 mm $\phi$ 240 mm $\phi$ 300 mm $\phi$ For data collection 0.3 0.6 0.6 For zooming $\begin{cases} 0.1- & 0.1- & 0.1- \\ 0.47 & 0.75 & 0.94 \end{cases}$
CT value	From -1000 to +8000
Functions	Averaging, Standard deviation, Area calculation, and Distance calculation

## 2. 産業用 X 線 CT スキャナーの開発

### 2.1 開発の概要

CT スキャナーは 1 世代から 4 世代と呼ばれるシステムが開発され実用化されている。その撮影方式を Fig. 1 に示す。中エネルギー CT スキャナーは 140 kV パルス X 線と 512 チャンネル Xe 検出器を用いた汎用の第 3 世代高速 CT スキャナーである。X 線管と検出器を固定し対象物を回転させる。X 線の一部は被検査物に吸収され透過した X 線は検出器に入射する。検出器から出力されたアナログ信号はデジタルに変換されて中央

処理部へ送られる。1 断面の撮影で全周から数 10 万点のデータを得る。このデータを用いて画像再構成演算を行い断層像を作成する。1 断面の再構成は 15 s である。また数 10  $\mu$ m の欠陥や構造を表現できる分解能を有している。140 kV という X 線の透過能力よりセラミックス、軽合金、プラスチック、木材など比較的 X 線の透過率の良い対象物に対し優れた表現能力を発揮する。Fig. 2 にシステム構成、Table 1 に主な仕様を示した。

高エネルギー CT スキャナーは 420 kV の連続 X 線を用いた実験用スキャナーである。1 世代のデータ収集方式を採用し、Translate と Rotate 動作は試料台が行う。データピッチとデータ点数は任意に選択できる。また高精度のタングステンコリメータと BGO(ビスマス・ゲルマニウム酸化物) シンチレータにより効率よく X 線を検出する。本システムは多様な可能性を探るために製作したもので、今回、ジルコニア系耐火物の解析に用いた。

### 2.2 CT スキャナーの画像再構成

検出器で測定されたデータはいろいろな前処理を施されると同時に log 変換され、投影データとして保存される。X 線を対象物の Y 軸方向に沿って照射した時の投影データは次の式で示される<sup>10)</sup>。

$$g(X, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(X \cos \theta - Y \sin \theta,$$

$$X \sin \theta + Y \cos \theta) dY \dots \dots \dots (1)$$

ただし  $g(X, \theta)$  は X 線強度の減衰率の対数変換で投影データと呼ばれる。このようなデータを  $0 \leq \theta < 2\pi$  において取得しフィルター補正逆投影法で画像再構成を行う。投影データから原画像を再構成するには角度  $\theta$  方向の投影データを一次元フーリエ変換し周波数  $\omega$  の領域でフィルター関数、絶対値  $\omega$  を作用させ修正された投影データ  $q(X, \theta)$  を作る。

$$q(X, \theta) = 1/4\pi \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) |\omega| \exp(i\omega X) d\omega \dots\dots\dots (2)$$

この  $q(X, \theta)$  を逆投影することにより求める X 線吸収係数の分布  $f(x, y)$  が得られる。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} q(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta \dots (3)$$

この演算は精度と処理シーケンスの都合から実現手段として同等の結果が得られる重畳積分法で実行している。原領域で周波数  $\omega$  の関数  $H(\omega)$  を逆フーリエ変換したフィルター関数  $H(X)$  を作る。

$$H(X) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \exp(i\omega X) d\omega \dots\dots (4)$$

これを投影データに重畳積分し逆投影に適した投影データ  $q(X, \theta)$  を得て式(3)のごとく原画像を得る。この方法はすべての処理を原領域で行える特長を持っている。一般的に産業用では X 線透過率の小さい対象物が多い。従つて投影データの収集には比較的長時間を要する傾向がある。1 方向の投影データを重畳積分し逆投影する処理が他方向のデータと無関係に行える重畳積分法は、処理時間の短縮という意味から産業用に適した方法である。

X 線の吸収係数の分布として得た断層像を CT 値として変換し画像データとしている。CT 値は次のように定義される。

$$CT \text{ 値} = \frac{\mu_0 - \mu_s}{\mu_s} \cdot K \dots\dots\dots (5)$$

ここで  $\mu_s$  は基準物質の X 線吸収係数 (通常は水を用いる場合が多い),  $\mu_0$  は撮影対象物の X 線吸収係数, また  $K$  は定数で通常, 1000 を使用する。一般的には水を 0, 空気を -1000 としたスケールを用いているが実効 X 線エネルギーを 100 KeV とした時の理論 CT 値を Table 2 に示した。式(4)のフィルター関数  $H(\omega)$  は周波数の絶対値  $\omega$  に比例したものが要求されるが、実

Table 2. CT Values of typical substances.

Substance	Mass absorption coefficient $\mu$	X-ray absorption coefficient $\mu_0 = \mu \times \rho$	CT value
	Air	0.155	
Water	0.171	$0.171 \times 1 = 0.171$	0
Concrete	0.169	$0.169 \times 2.3 = 0.389$	1275
Aluminium	0.169	$0.169 \times 2.69 = 0.455$	1661
Steel	0.370	$0.370 \times 7.86 = 2.908$	16006
Lead	5.46	$5.46 \times 11.34 = 61.916$	361082

際には発散する関数を用いることはできない。そのため高域で減衰する関数を工夫して使うことになるが、このフィルター関数の特性により画質が大きく影響を受ける。高域を強調した関数では空間分解能があがるが、反面偽像 (アーチファクト) を発生しやすく、逆に高域を劣化させると画像のスムージングを行えるが空間分解能を低下させる。

産業用の対象物では、さまざまな材質や、複合材料があるため、特性の異なるフィルター関数を開発し、簡単に選択使用できるようにしている。

2.3 CT スキャナーの画質

画像の質は一般的に次の項目で比較される。

- (1) 階調または密度の分解能, (2) 階調の直線性,
- (3) 空間分解能, (4) ノイズ, (5) 偽像.

偽像を除いてそれぞれの項目で関連があるため総合的に検討する必要がある。CT スキャナーでは限られた空間分解能の中で優れた階調分解能、つまり欠陥や構造の表現をすることができる。それは散乱 X 線データを含まない信号の検出と、空間分解能に見合ったデータ量つまり X 線照射量を確保することで達成されている。中エネルギー CT スキャナーではアルミニウムやセラミックスの場合、0.5~2% の密度変化を特に画像処理を加えることなく表現できている。また吸収係数の変化に対し CT 値の直線性が良いのも産業用 X 線 CT スキャナーの特徴である。しかし、いろいろな波長を含む白色 X 線を用いているので、材質や形状による線質硬化 (ビームハードニング) の影響で必ずしも直線性が得られるとは限らない。補正を加えることでこの修正はできるが、X 線の吸収が大きい対象物の場合は、式(5)で求められる CT 値に誤差を含むことに注意を要する。ただし、あらかじめ直線性の歪みを確かめ画像の性質を知ることができれば大きな支障にはならない。

空間分解能はシステム全体の変調度伝達関数 (MTF) で決定されており主として次の要因による。

- (1) 検出ピッチ, (2) 画像再構成の画素寸法; 画素とは再構成マトリックスの最小単位をよぶ, (3) フィルター関数の特性, (4) フィルター補正逆投影法の補完形式, (5) X 線源の大きさと検出器開口の寸法, (6) 幾何的配置, などである。第 3 世代中エネルギー CT スキャナーでは限られたチャンネル数の検出器で空間分解能を有効に得るためにクローズアップスキャンを行つている。最大分解能は、検出ピッチをあげ、高域を強調したフィルター関数を用いることにより得られ、20  $\mu\text{m}$  のスリットを検出することができた。この時の有効画素寸法は、0.3×0.3 mm である。

高エネルギー CT スキャナーでは、検出ピッチ 10  $\mu\text{m}$ 、検出器開口幅とスライス厚は数 10  $\mu\text{m}$  に絞り込めるように工夫されており、必要な空間分解能に対応して設定できる。コリメーターを X 線源と検出器に設置していることより線源の影響を受けないよう考慮されている。また検出器開口を小さくした場合、単位画素当たりの X 線フォトン数が減少する。そのためデータ収集部の信号積分時間は最大 255 ms まで変えられるよう工夫されている。画像再構成をサポートするソフトウェアには、データ収集のさまざまな形式に対応できる柔軟性を持たせているため、像質の検討を自由に行うことができる。医療用と異なり産業用の場合、検査室を独自に保有し防振、防塵、X 線遮へい対策が十分とられていることも特長の一つである。

### 3. X 線 CT スキャナーの耐火物への適用

浸漬ノズルを中心とする連铸用耐火物、RH 脱ガス装置用耐火物の測定を行い耐火物への適用を検討した。

#### 3.1 連続铸造用浸漬ノズルへの適用

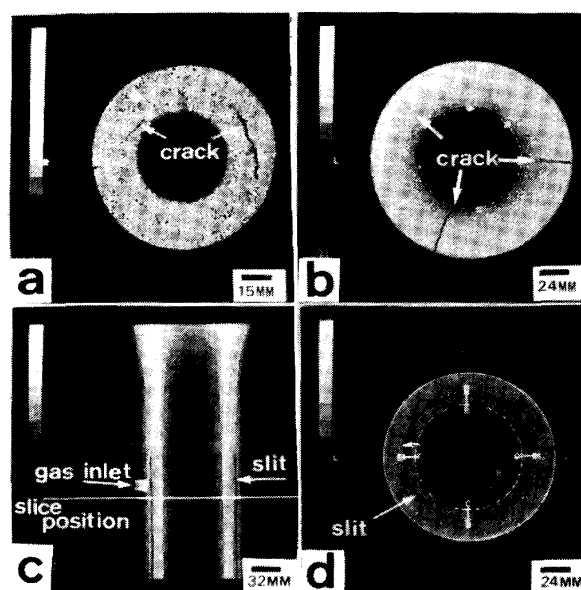
中エネルギー CT スキャナーにより欠陥、き裂、スリット、酸化層の観察、CT 値等を検討した。測定条件は 140 kV、300 mA、5 mm スライスである。

##### 3.1.1 欠陥探査、き裂、スリットの観察

ズームングを使用すると 100  $\mu\text{m}$  以下の欠陥をも識別できる解像力を利用して Photo. 1 にアルミナ・黒鉛質模擬サンプルの欠陥探査例 (a)、回収された使用後ノズルのき裂観察例 (b)、およびスリットタイプ浸漬ノズルのスキャノグラム像 (c)、白線位置における断層像 (d) をそれぞれ示す。欠陥、き裂、スリットが明瞭に表現されている。スリットはノズル内に不活性ガスを導入しメタル、介在物の付着を防止する目的で設けられているもので内孔と同芯円状に設置される必要がありスリット位置の正確さは操業上、極めて重要である。

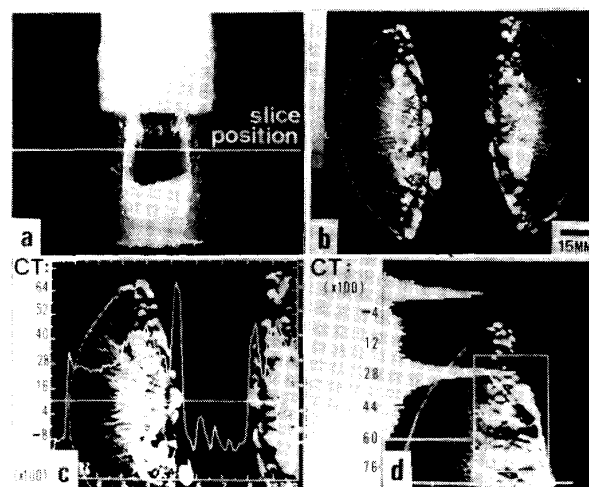
##### 3.1.2 使用後浸漬ノズルの解析……その 1

使用後、回収されたノズルを用いて断層撮影を行い X 線の吸収値 (CT 値) を表示した例を Photo. 2 に示す。該ノズルはアルミ・キルド鋼の铸造に使用されたものである。スキャノグラム像の吐出孔上部の白い部分はジルコニアを骨材として含有するモールドパウダーライン (二層構造部) である。吐出孔内には吸収値の高いメタル、アルミナ系付着物と推定されるものが残留しているのがわかる。白線部位での断層像を (b) に示す。ノズル母材は黒色を呈した半月状の部分である。この外周、吐出孔部には輝度の高い付着物が生成しているのが認められる。内孔部の付着物で最も厚い部分は約 15



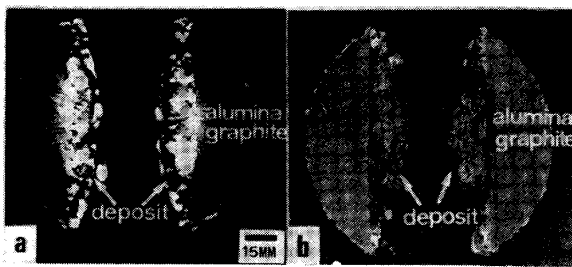
(a) Crack found in an alumina-graphite imitation specimen  
(b) Cracks found in a used submerged nozzle  
(c) Scanogram image of slit type submerged nozzle  
(d) Tomogram of slit type submerged nozzle.

Photo. 1. Cracks and slit of alumina-graphite submerged nozzle.



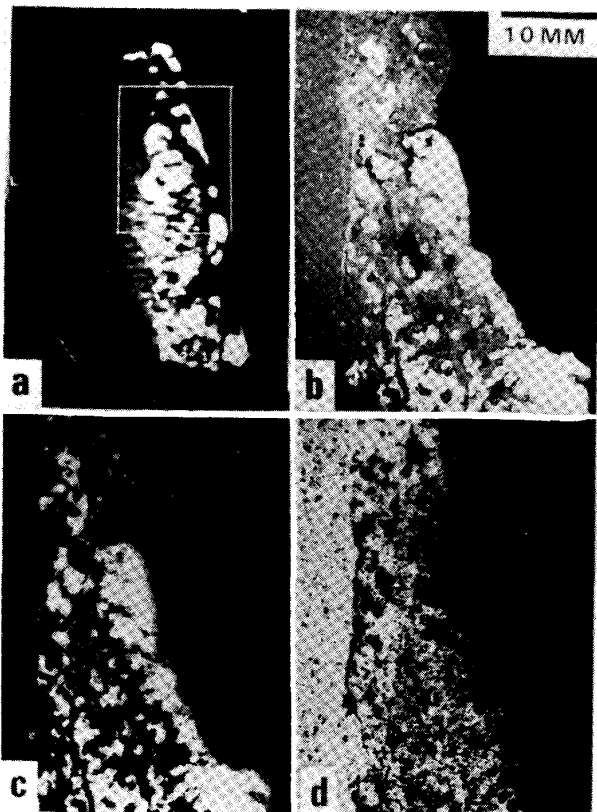
(a) Scanogram (b) Tomogram (c) Profile (d) Histogram  
Photo. 2. Tomogram of used alumina-graphite submerged nozzle and its processing.

mm である。(c)は断層像左部のクローズアップ像で白線上での CT 値プロフィールを示す。ノズル母材は CT 値が約 2800 のレベルに分布する。吐出孔側の CT 値は 4000~6400 と高い値である。これはノズル材質よりも密度が大きい物質が付着していることを意味する。(d)は白線で囲った領域における CT 値のヒストグラムを示す。このヒストグラムの中で、ノズル母材の CT 値は 2800 のピークを中心とした部分であり、空気はこれより上方の -1000 の部分、またメタルは下方の 6000



(a) Tomogram (b) Cut surface

Photo. 3. Tomogram and cut surface at the tomographed position.



(a) Tomogram (b) Polished surface of the sample  
 (c) FeK $\alpha$  image Condition : Acceleration voltage : 15 kV  
 (d) AlK $\alpha$  image Probe current : 0.1  $\mu$ A  
 Pixel size : X=100 $\mu$ m, Y=80 $\mu$ m  
 Measuring point : X=300  
 Y=460

Photo. 4. Images by wide area mapping (EPMA).

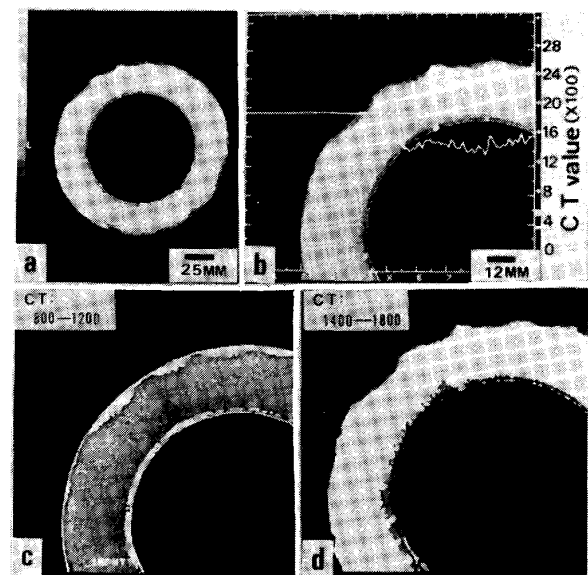
のピークにそれぞれ相当することがわかる。

断層像により観察された使用後浸漬ノズルの内部状況つまり CT 値、明暗の輝度とノズル材質、付着成分との相関性を確認する目的で上記ノズルをスライス位置と同一箇所にて切断した EPMA による広域面分析 (マッピング) を実施し断層撮影結果と比較した。Photo. 3 に断層像と相当部位の切断面写真を示す。この切断面の左側上部分より研磨試料を作成し Al, Fe, Ca の各元素について上記分析を実施した。Photo. 4 に研磨面と各

元素のマッピング像を示す (a) 研磨面の白く光つた部分が Fe で付着部分に塊状で存在する、一方 Al は母材と付着部に認められるが付着部の Al は粒状である。付着部は定性分析の結果 Fe, Al, Ca, Si より構成され、かなりポーラスである。以上の分析結果よりノズルに付着した付着物は X 線の吸収の高い (CT 値の高い) 順に Fe 部, Al 部, Si 部, Ca 部から成り、Fe 以外はいずれも酸化物であることが判明した。従つて Photo. 2(d) のヒストグラムのうち最も CT 値が高いピークは Fe でこれはメタルに相当する。このメタルとノズル母材のピーク間を Al を主とした酸化物系付着物が位置し、またノズル母材 (CT 値 2800 のピーク) と空気のピーク (CT 値 -1000 のピーク) 間は、Si, Ca など比較的 X 線の吸収が低い元素や、Al 系酸化物がポーラスな状態で存在しているものと推定される。従つて CT 値の分布と EPMA による分析結果は、ほぼ対応していることが判明した。

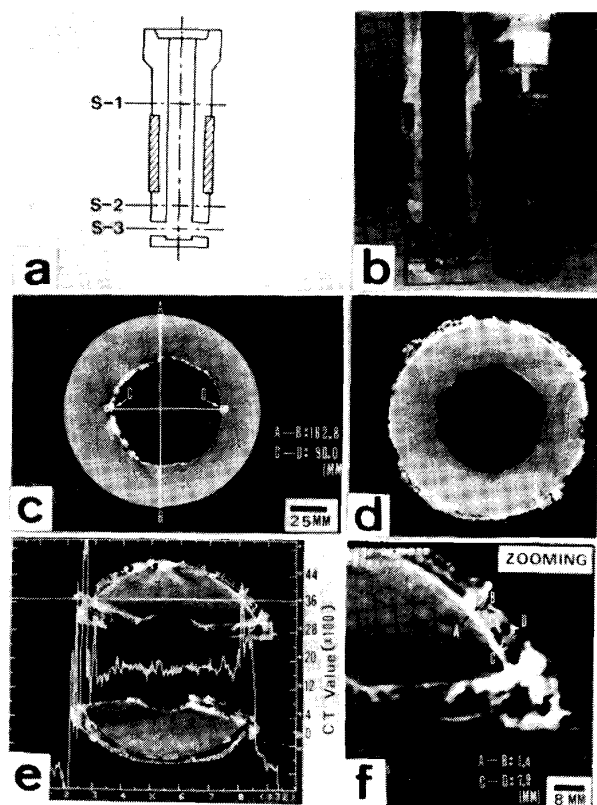
### 3.1.3 使用後浸漬ノズルの解析……その 2

浸漬ノズルは原料の一部に黒鉛が使用されていることより予熱時あるいは使用時に酸化され劣化を来すことがある。従来より酸化層の厚み測定は切断後、目視により実測しているが酸化部分と未酸化部分の境界は不明瞭で判定が困難であつた。CT スキャナーの断層像より酸化層を解析した例を Photo. 5 に示す。この試料は 1600  $^{\circ}$ C, 5 h ガス炉にて加熱後急冷し酸化防止コーティングの剝離と剝離部分の酸化状況を観察した。試料外周の黒



(a) Tomogram (b) Profile  
 (c) CT value=800-1200  
 (d) CT value=1400-1800

Photo. 5. Analysis of oxidized layers (CT values and band display).



(a) Position where tomograph was taken  
 (b) Cut surface after inspection by CT scanning  
 (c), (d), (e), (f) Tomogram

Photo. 6. Tomograms of used submerged nozzle.

色部分が酸化された箇所である。ズームング像 (b) の CT 値プロフィールによると黒色部分は低い値となっている。またバンドディスプレイ処理像 (c), (d) により上記酸化部 (c) と未酸化部分 (d) が定性的に判別可能である。このような画像処理を行うことにより材料の劣化箇所とその程度を容易に知ることができる。バンドディスプレイは密度差のある原料の分布状況あるいは異物混入のチェックなどに応用することができる。

### 3.1.4 使用後浸漬ノズルの解析…その3

使用された浸漬ノズルの各部位を断層撮影することによりノズルの損傷と溶鋼流の関係について考察した。その例を Photo. 6 に示す。断層撮影部位はフランジ下 (S-1)、溶鋼浸漬部 (S-2)、吐出孔部 (S-3) の3カ所である。(S-1) の断層像 (c) では内孔部の左半分に地金の付着があり、右半分は若干溶損されていることから、この部位では溶鋼が右側に偏って流れていたものと推定され、スライドゲートの開度等に影響されたものと考えられる。(S-2) の断層像 (d) では地金の付着はなくほぼ均一に溶損されている。これより溶鋼の偏流は無かつたと推定されるが吐出孔の湯流れの影響を受けており、やや真円からずれている。この外周に付着した付着

物の厚みは約 8 mm である。(S-3) の断層像 (e), (f) ではノズル内孔、外周に付着物が生成しているのが認められる。既述した分析結果によると付着物は CT 値の高い白色のメタル部が約 1.5 mm、その外側にややポラスなアルミナ系酸化物が約 8 mm の厚さで存在する。下方の付着物はノズル母材より剥離している状況がよくわかる。撮影後切断し上記の観察結果を確認することができた。断層撮影によつて使用直後の損傷状況が適確に把握されるためノズル損傷の諸要因、例えば溶損、割れ、付着物生成、閉塞などのメカニズムの解析に有効なデータが非破壊で瞬時に得られる。

## 3.2 耐火物における X 線吸収値 (CT 値) の適用

既述してきたように対象物の断層像から画像処理によつてあらゆる部分の CT 値が算出される。この機能を利用すると耐火物の内部状態を数値化して評価することができる。そこで従来から用いられている物理特性と CT 値の相関性についてアルミナ黒鉛質試料にて検討を行い、更に使用後 RH 脱ガス装置用レンガの解析に適用した。

### 3.2.1 アルミナ黒鉛質試料における物性値と CT 値の相関性

アルミナ黒鉛の組成を所定比率で変え 1000 kgf/cm<sup>2</sup> の成形圧力で成形して試料を作成した。素地試料 (40 φ mm)、焼成体試料 (40 φ mm) の CT 値、組成とかさ密度の関係を Fig. 3 に示す。形状 40 φ mm の試料では素地、焼成体ともに CT 値は近似しアルミナ含有量の減少に比例して低下しかさ密度に相関する。また別途作成した 130 φ mm 試料の CT 値は 40 φ mm 試料に比

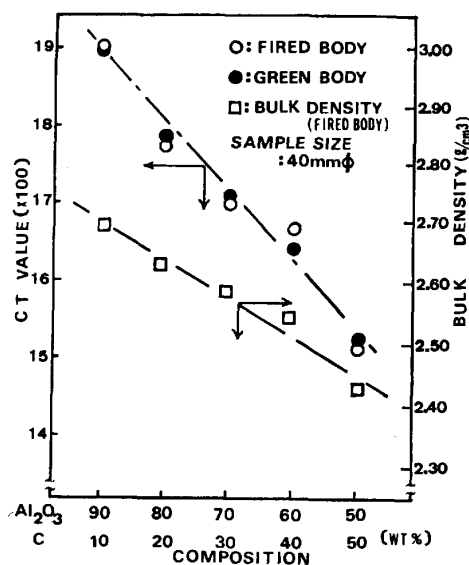
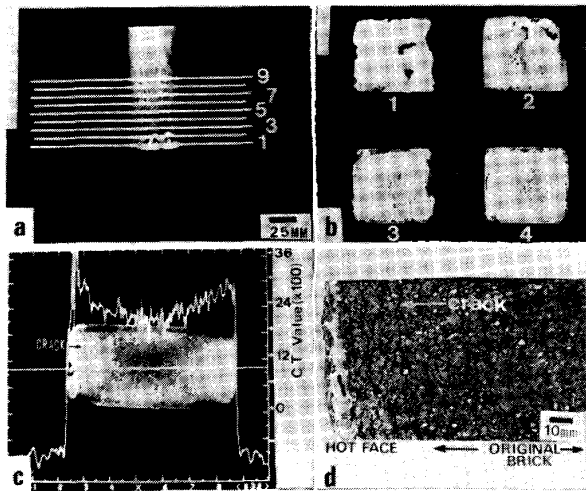


Fig. 3. Correlation of composition of alumina-graphite material with CT value.

べ低い値であった。これはX線の線質硬化により透過特性が歪むことによる。従つて CT 値により材料を評価



(a) Scanoграм  
 (b) Tomograms : No.1, No.2, No.3, No.4  
 (c) Profile of CT value from tomogram in the longitudinal direction  
 (d) Cut surface

Photo. 7. Tomogram and CT value of magnesia-chrome brick used for a RH method.

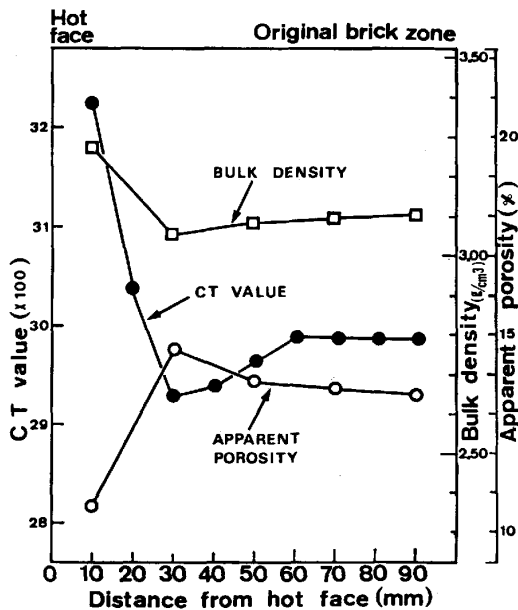


Fig. 4. Bulk density, apparent porosity and CT value at different places of magnesia-chrome brick used for RH method.

Table 3. Results of quantitative analysis of Magnesia-Chrome brick after use at RH method on steel industry.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Total
Hot face	7.89	19.97	0.39	32.49	1.32	32.21	0.02	3.99	4.13	101.28
Original brick zone	2.13	6.65	0.22	4.28	0.82	74.59	0.02	10.21	0.04	99.48

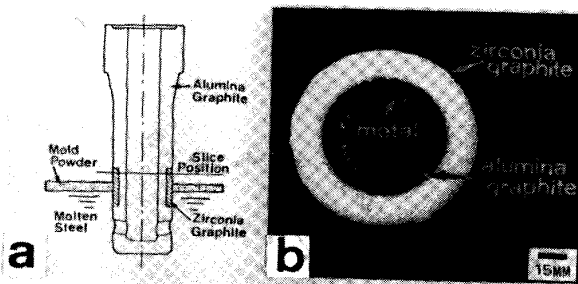
する場合、形状因子を考慮に入れなければならない。

3.2.2 使用後マグ・クロ質れんがの解析

CT 値と耐火物の物性値が相関することを利用して RH 脱ガス処理装置 (170 t 取鍋, 300 回にて回収) に使用されたマグ・クロ質れんがの解析を行った。Photo. 7 に透視像, 断層像, CT 値プロフィール, 切断面写真を示す。CT 値は (a) に示した白線位置 (稼働面より 10 mm ピッチ) で断層像を測定しそれぞれ一定面積の平均 CT 値を求めた。長手方向に垂直な方向の断層像 (c) によると稼働面近傍ほど CT 値が高い。ただし欠け, き裂も認められる。プロフィール (c) から稼働面側 (左端) で高くオーバスケールしている, 中央部で下がっているのは前述の線質硬化による。断層撮影後, 長手方向に平行な位置で切断し, 断層部位に相当する位置で試料を採取し物性を測定した。かさ密度, 見掛気孔率, CT 値の各部位における測定結果を Fig. 4 に示す。かさ密度, CT 値は稼働面側で高く, 見掛気孔率は低い傾向がある。これは溶鋼スラグ起源の成分が組織内に侵入しち密化したためと考えられる。侵入した成分は原れんが成分よりも CT 値の高い元素を含有する。稼働面より約 30 mm 深部で CT 値, かさ密度が低下し見掛気孔率が上昇しているのは使用時の熱サイクルにより組織が脆弱化したことを意味する。Photo. 7(d) の切断面を観察すると上記位置付近に小き裂が観察されこの傾向が裏付けられている。稼働部 (10 mm) と原れんが部 (80 mm) の位置で採取した試料の化学分析結果を Table 3 に示す。この Table より稼働面から Si, Al, Fe, Mn が侵入し一方原れんがより Mg, Cr 成分が溶出していることが認められる。従つて稼働面における CT 値の上昇は Fe, Mn の侵入とち密化に起因すると推定される。このように非破壊で CT 値を測定することによりれんが損傷に関する内部情報を的確につかむことができる。

3.3 高エネルギー X 線 CT スキャナーの耐火物への適用

連铸, 製鋼用耐火物として使用されている材質の中で 既述してきた中エネルギー装置では透過しないものがあ



(a) Position where tomograph was taken  
(b) Tomogram at the powder line

Photo. 8. Tomogram at the powder line of submerged nozzle, taken with high-energy CT scanner.

る。例えばジルコニアを含有する浸漬ノズルモールドパウダーライン部、ジルコニア質タンディッシュノズル等である。該材質には最高 420 kV の高エネルギータイプ・スキャナーが適用される。撮影例として浸漬ノズルのモールドパウダー部の二層構造の断層像を Photo. 8 に示す。パウダーライン部は外壳を高耐食性のジルコニア黒鉛質、内孔側をアルミナ黒鉛質とした二層構造体である。模式図に示した位置でスライスした断層像は、二層構造体の状況と(密度差のちがいが)、接合状況がよく撮像されている。内壁に少量の地金が付着しているのも認められる。なおこの時の撮影条件は、X線管電圧：360 kV 管電流：3.5 mA X線ビーム幅：1.0 mm スライス厚：0.5 mm サンプリングピッチ：0.5 mm プロジェクション数：200 である。

#### 4. 結 言

非破壊で対象物の内部欠陥探査を行い、その内部状態を数値化して評価することを目的として産業用X線断層撮影装置を開発した。中エネルギー、高エネルギー・スキャナーを用い連铸用耐火物のうち特に浸漬ノズルを中心に測定し、適用性について検討した。その結果、非破壊

欠陥探査装置としての性能が確認されるとともにX線吸収値(CT値)を利用すると対象物の内部状態を数値化して評価できることが判明した。

近年、鋼の高級化にともない使用条件も過酷化し耐火物の品質向上、長寿命化、高信頼性が強く要請されている。このような状況の下で、該装置がタイムリーに開発されたことは耐火物の特性評価、あるいは溶損、割れ、閉塞等の損傷メカニズムを考察する上で新しい情報を提供し耐火物技術の進歩に大いに寄与すると確信する。得られたデータは記録、保存ができることより新材料の開発、品質の管理等に今後活用されることが予想される。また、よりいつそうの高速化、高分解能化、対象物にマッチしたソフトウェアの開発を進めるとともに近い将来、RIを用いた $\gamma$ 線CTスキャナー、さらにエネルギーの高いライナックCTスキャナーの応用も広がるであろう。

CTスキャナーは今後、材料開発、製品の品質管理の分野で広範囲に適用されていくことが期待される。

#### 文 献

- 1) G. HOUNSFIELD: British patent, No. 1283915 (1972)
- 2) 鈴木 徹: 原子力学会誌, 25 (1983), p. 2
- 3) P. REIMERS and J. GOEBBELS: Materials Evaluation, 41 (1983), p. 732
- 4) 田口 勇, 釜 三夫, 中村滋男: 鉄と鋼, 70 (1981), S 424
- 5) 田口 勇: 日本金属学会会報, 22 (1983), p. 1017
- 6) 中村滋男, 谷本慶哲, 藤井正司: 東芝レビュー, 38 (1983), p. 1073
- 7) 沖 和男, 荒川和三, 杉江満寿夫, 栗原勲二, 相庭吉郎: 鉄と鋼, 70 (1984), S 166
- 8) G. GANELLI and F. MONTI: Refractories J., 2 (1981), p. 11
- 9) 柴田英俊, 平櫛敬資, 福岡弘美, 兼松勤治: 耐火物, 32 (1980), p. 696
- 10) 岩井喜典編: CTスキャナ(1979), p. 38 [コロナ社]