

光・量子技術 特集
メカトロニクス技術

論文・報告	ダブルパルス固体レーザーアニーリング技術の液晶・半導体への適用	山崎和則, 櫻木 進, 若林直木, 工藤利雄	1
	重粒子線がん治療装置用小型入射器の開発	密本俊典, 筒井裕士, 岩田佳之, 山田 聡	7
	理研中間段リングサイクロトロンの高周波システム	戸内 豊	11
	カセット方式FDG合成装置(F200)の開発	田中栄士	15
	[¹¹ C]メチオニン合成装置の開発	渡辺利光, 新屋 洋, 上野悟史	19
	リニアモータとボールネジの駆動特性評価	富田良幸	23
技術解説	超小型PETサイクロトロン制御系の開発	越智俊昭	27
	RPD法によるZnO成膜技術	伊藤秀彦, 木下公男	29
	RPD法によるSiON成膜技術	伊丹 哲, 三好 陽	31
	テンションコントロールシステムの開発	三好清人	33
	高周波PWMドライバSDPDの開発	白石貴司	35
	サーボドライバGS-200の開発	木根原慎一, 千々岩敏彦	37
	RI製造システム CYPRIS HM-7		39
新製品紹介	自動品質管理装置 Q200		40
	新型ホットセル		41
	イオンビームスキヤニング電源		42
	クラスタ式RPD成膜装置		43
	液晶製造装置用大型汎用ステージ		44

論文・報告

圧縮成形装置 SY-COMPの開発	福岡 大, 深山寿秀	45
-------------------	------------	----

技術解説

新型半導体モールド装置 SXシリーズ	澤田博行, 曾根正明, 嶋崎重昭, 川野 勉	49
衛星搭載クライオスタットの軌道上実績	恒松正二, 平林誠之, 吉田誠至	51
下水発生活泥量抑制プロセス	淵脇賢二郎	53

新製品紹介

アンパイリング/パイリング用リフティングマグネット装置		55
アステロ 直交ギヤヘッド		56
クーリングタワー用減速機 低騒音SFCシリーズ		57
油圧ショベル SH200-5 SH240-5		58

Sumitomo Heavy Industries Technical Review

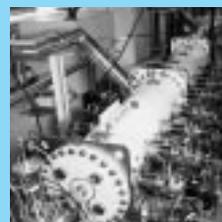
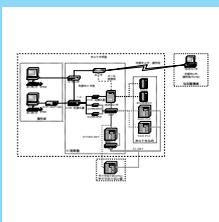
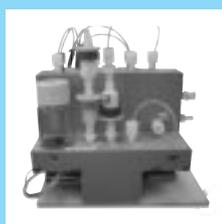
No. 162 2006

Special Section
of Optics and Quantum Technology
& Mechatronics Technology

Special Section
of Optics and Quantum Technology
& Mechatronics Technology

T/PAPER	Double-pulse Solid-state Laser Annealing Technologies Applied for LCD and Semiconductor Manufacturing Processes Kazunori YAMAZAKI, Susumu SAKURAGI, Naoki WAKABAYASHI, Toshio KUDO	1
	Development of Compact Injector for Heavy-ion Cancer Therapy System Toshinori MITSUMOTO, Hiroshi TSUTSUI, Yoshiyuki IWATA, Satoru YAMADA	7
	RF System for RIKEN Intermediate Ring Cyclotron Yutaka TOUCHI	11
	Development of Cassette Type FDG Synthesizer(F200) Eiji TANAKA	15
	Development of Miniature Module for [¹¹ C]Methionine Synthesis Toshimitsu WATANABE, Hiroshi ARAYA, Satoshi UENO	19
	Evaluation of Drive Performance of Linear Motor and Ball-screw Yoshiyuki TOMITA	23
T/INVITATION	Development of Ultra Small Size PET Cyclotron System Toshiaki OCHI	27
	ZnO Deposition System by RPD Method Hidehiko ITO, Kimio KINOSHITA	29
	SiON Deposition Process by RPD Method Tetsu ITAMI, You MIYOSHI	31
	Development of Tension Control System Kiyoto MIYOSHI	33
	Development of High Frequency PWM Driver SDPD Takashi SHIRAISHI	35
	Development of Servo Driver GS - 200 Shinichi KINEHARA, Toshihiko CHIJIIWA	37
NEW PRODUCT	RI Manufacturing System CYPRIS HM - 7	39
	Quality Control System Q200	40
	New Hot Cell	41
	Ion Beam Scanning Power Supply	42
	Cluster Type Reactive Plasma Deposition	43
	Linear Guided Gantry Moving Type of Large Stage for FPD	44
T/PAPER		
	Development of Compression Molding Machine SY - COMP Yutaka FUKUOKA, Toshihide MIYAMA	45
T/INVITATION		
	New Molding Machine SX Series Hiroyuki SAWADA, Masaaki SONE, Shigeaki SHIMASAKI, Tsutomu KAWANO	49
	Results on Orbit of Cryostat Equipped for Satellite Shoji TSUNEMATSU, Masayuki HIRABAYASHI, Seiji YOSHIDA	51
	Low Excess-sludge Production Process in Sewage Treatment Kenjiro FUCHIWAKI	53
NEW PRODUCT		
	Lifting Magnet Device for Unpiling/Piling	55
	ASTERO Right Angle Gear Head	56
	SFC Low Noise Model for Cooling Tower Drive	57
	Hydraulic Excavator SH200 - 5 SH240 - 5	58

光・量子技術
メカトロニクス技術 特集



ダブルパルス固体レーザーアニーリング技術の液晶・半導体への適用

Double-pulse Solid-state Laser Annealing Technologies Applied for LCD and Semiconductor Manufacturing Processes

山崎 和則* 櫻木 進* 若林 直木* 工藤 利雄*
Kazunori YAMAZAKI Susumu SAKURAGI Naoki WAKABAYASHI Toshio KUDO

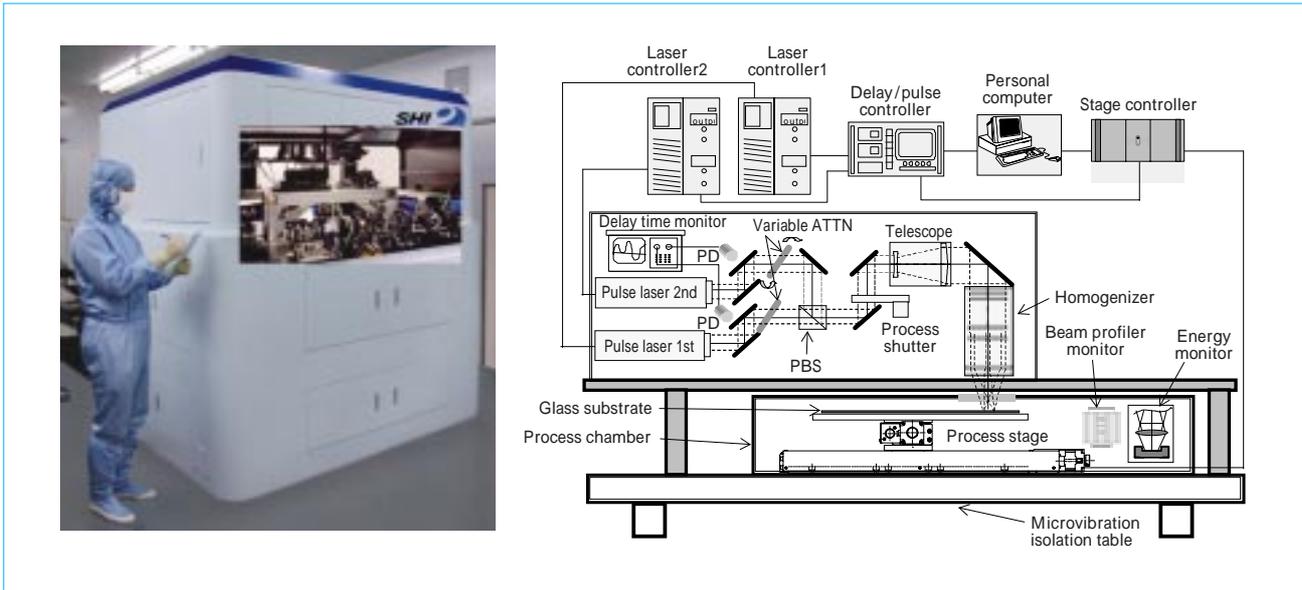


図1 ダブルパルスレーザー固体アニーリング装置（左）とシステム構成（右）
Picture (Left) and schematic constitution (Right) of double-pulse solid-state laser annealing system

新たに開発したダブルパルス制御方式の固体グリーンレーザーアニーリング装置を用いて、液晶・半導体向けの新しい熱処理プロセスを開発した。ダブルパルス法は、2台のレーザーに数百ns程度の遅延時間をつけて照射する手法である。0.5% (rms) のパルスエネルギー安定性と、パルス幅に対し3% (rms) の遅延時間コントロール精度により被照射物への入熱量とその時間履歴を正確にコントロールすることができ、デバイスの高性能化に大きな効果を発揮する。本照射法を液晶低温ポリシリコン薄膜トランジスタ (LTPS TFT) のポリシリコン (Poly-Si) 薄膜結晶化プロセスに適用し、単結晶並みの高移動度600 cm²/Vsを達成した。また、高性能パワートランジスタIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の素子裏面の活性化プロセスに適用し、表面の配線層に熱ダメージを与えることなく、80%以上の高い活性化率で1.8 μm深さのpn接合を形成できた。

The double-pulse laser annealing system with two solid-state green lasers were developed. Using this system, innovative laser annealing processes for LTPS TFT (Low Temperature Poly-Si Thin Film Transistor) of LCD(Liquid Crystal Display) and for high performance power transistor, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) were developed. The double-pulse method is the technique where two lasers are irradiated with the delay time of several hundred nano seconds between them. The system is characterized by the high pulse energy stability of 0.5% and the precise delay time control with less than 3% fluctuations to the laser pulse width. They help to effectively control the time evolution of process temperature, which contributes to the improvement of device performances. Applying this technique to the crystallization process of poly-Si films for LTPS TFT, high field effect mobility of 600cm²/Vs comparable to that of single crystal TFT was obtained. And for the backside activation annealing process of IGBT, a deep pn junction of 1.8 μm with high activation ratio of more than 80% were obtained without thermally damaging the circuit elements on the front face.

1 まえがき

パルスレーザーを用いた短時間熱処理技術は、被照射体の最表面のみを加熱し支持基板の過熱を抑える低温プロセスとしてトランジスタ形成に広く検討されてきた。被照射体に対する吸収効率の高い波長を用いることによりレーザー光の進入は

最表面に限られる。しかも、ナノ秒からマイクロ秒という極めて短いパルス幅を持ったレーザーによる照射であることから、被照射部からの熱拡散も抑制される。その結果、深さ方向への熱影響は極めて限定された表面近傍のみとなり、熱効率の良い低温・省エネプロセスと言える。この特長を生かして実用化されたプロセスの代表として、液晶ディ

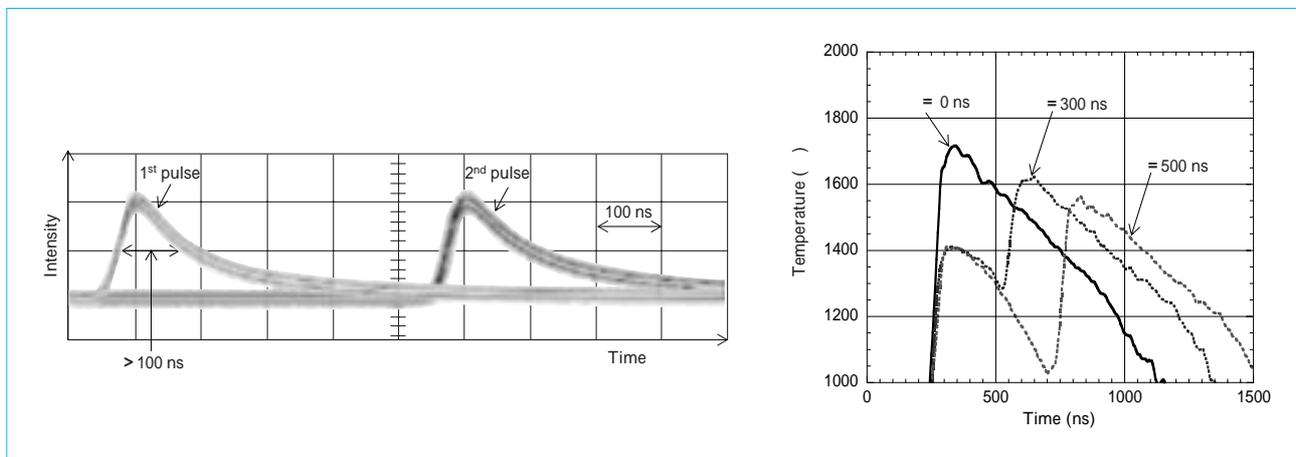


図2 ダブルパルス照射時のレーザーパルス波形（左）と遅延時間を変えてダブルパルス照射を行ったときのSiウエハ表面での温度履歴測定結果（右）
Measured laser pulse profiles with double pulse irradiation (Left) and measured time evolution of temperatures on Si wafer with various delay time (Right)

スプレイ（LCD）の駆動素子である低温ポリシリコントランジスタ（LTPS TFT）のpoly-Si薄膜形成プロセスがある。また、高性能パワートランジスタであるIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）の活性化アニーリング装置は当社が世界に先駆けて実用化した。

LTPS TFTは、携帯電話や携帯情報端末などに搭載する液晶ディスプレイに近年広く採用されている。量産化されているpoly-Si薄膜製造プロセスは、紫外光であるエキシマレーザーを用いたELA（Excimer Laser Annealing）法が主流である。本プロセスは、無アルカリガラス上に形成されたa-Si薄膜にレーザー光を照射し、a-Si薄膜表面近傍のみを加熱し熔融再固化により欠陥密度の少ない多結晶組織からなるpoly-Si薄膜を短時間に形成する結晶化プロセスである。a-Si薄膜と比べて2桁大きな $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度の電子移動度が得られることから、ドライバ回路などの周辺回路をガラス基板に一体形成できる特長を有する。しかし、CPUを含む全ての周辺回路を一体化する将来のシステムオンガラスの実現のためにはより一層高移動度のLTPS TFTが必要とされ、ELA法では限界がある。なぜなら、ランダムに発生する結晶核を起点に膜厚方向に結晶が成長するELA法では、成長する結晶サイズがせいぜい $0.5 \mu\text{m}$ 程度であり、高移動化にも限界があるからである。一方、本方式とは異なり結晶を膜厚方向ではなく横（ラテラル）方向に成長させてより大きな結晶を形成させるラテラル結晶化技術が提案され、各種方法が報告されている。当社は、パルス固体レーザーを用いたレーザーアニーリング装置と本装置を用いたラテラル結晶化技術を開発した。本装置は、固体レーザーの特長であるエネルギー安定性およびパルス間の精確な時間制御を生かしたダブルパルス制御方式を採用している。本方式は、ダブルパルスによる入熱時間履歴の最適化により大きな種結晶を形成し、従来ELA法と同様な長尺ビームの簡便な重複走査によって連続的にラテラル成長させることが可能である。

一方、高性能パワートランジスタIGBTの主な用途はモータ駆動などの電力制御である。薄型ウエハを用いる次世代型IGBTは、ウエハ表面にエミッタを、裏面にコレクタを形成し、電子を厚さ方向に輸送する。本デバイスへのレーザーアニーリングは、配線パターンが形成された素子表面ではなく、

コレクタが形成された裏面にレーザーを照射加熱し電氣的に活性化させるものである。本活性化プロセスにおいても上記ダブルパルス照射は極めて有効に作用し、ダブルパルスによる入熱時間履歴のチューニングにより活性化率および活性化深さをコントロールできる。

次章以降、開発したダブルパルス固体レーザーアニーリング装置の概要と上記二つのアニーリングプロセスの開発内容について報告する。

2 ダブルパルス固体グリーンレーザーアニーリング装置

図1に、開発したプロトタイプ機とシステム構成を示す。光源として、固体グリーンレーザーを2台搭載している。波長は 527 nm 、パルス幅は約 110 ns 、発振周波数は 1 kHz である。2台の光源から出射したレーザービームはバリアブルアッテネータでパルスエネルギーを調整された後、偏光ビームスプリッターで同一光軸上に合成され、均一化光学系に導かれる。均一化光学系により幅 $0.02 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、長さ $2.5 \sim 17.0 \text{ mm}$ の細線均一ビームが被照射物であるガラス基板およびウエハ表面に形成される。ビームサイズは上記範囲内において可変であり、結晶化プロセスと活性化プロセスとで使い分けている。照射プロセスは、ガラス基板あるいはウエハを搭載したステージを細線ビームの短軸方向に一定の速度で掃引しながらダブルパルス照射により行われる。ダブルパルスとは、2台のレーザーの発振タイミングをコントロールし、一定の遅延時間をつけて照射する手法である。遅延時間は、 $0 \sim 2000 \text{ ns}$ の間で設定できる。遅延時間により入熱の時間履歴がコントロールされ、結晶化プロセスにおける結晶成長サイズおよび活性化プロセスにおける活性化深さなどを最適化することができる。レーザーのパルスエネルギーおよび遅延時間の安定性をそれぞれ標準偏差値で 0.5% 以下および 3% 以下（対パルス幅）にコントロールすることにより、被照射物に投入される熱量およびその時間履歴の精度を上げプロセスの安定性を高めている。図2に、ダブルパルス照射時のレーザーパルス波形と温度測定結果を示す。遅延時間を $0, 300, 500 \text{ ns}$ と変化させることにより、被照射物表面のピーク温度および所定温度の保持時間を変えられることが分かる。

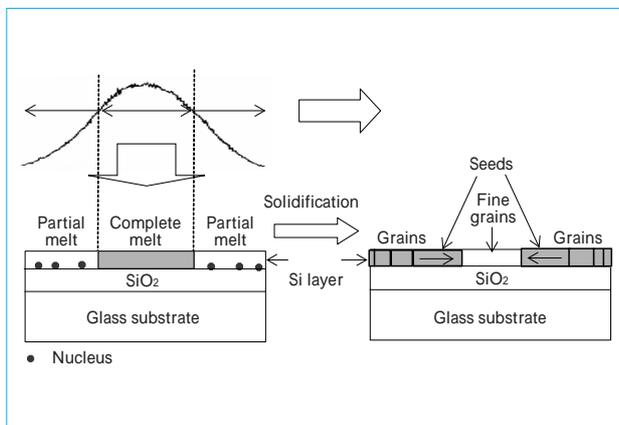


図3 1ショット照射による結晶成長機構
Crystal grain growth by one shot irradiation of line beam

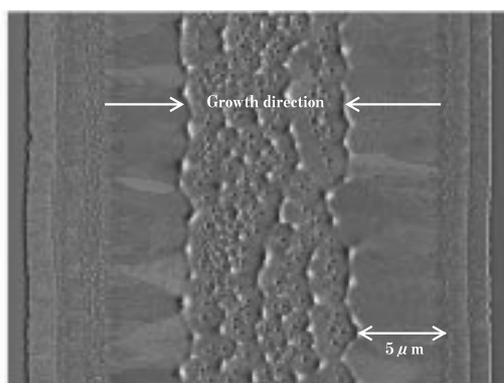


図4 1ショット照射で形成された結晶のSEM像
SEM image of grain growth by one shot irradiation of line beam

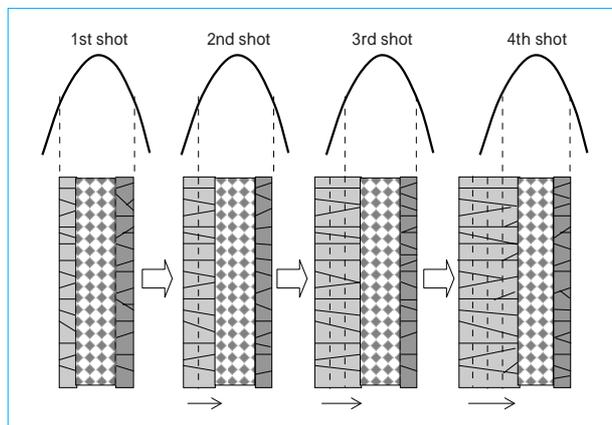


図5 ALCG法による連続ラテラル成長プロセス
ALCG process flow diagram

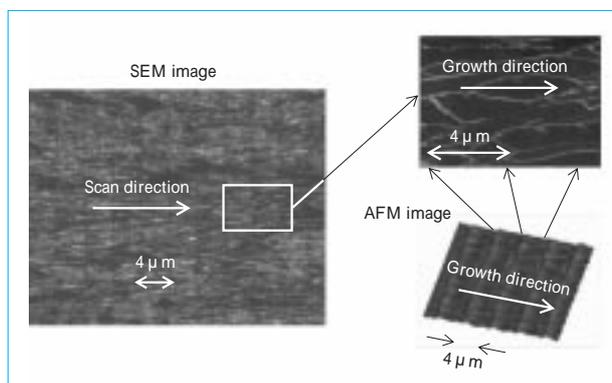


図6 ALCGシリコンのSEM像およびAFM像
SEM and AFM images of ALCG-Si thin-film

3 液晶への適用

3.1 ラテラル結晶化プロセス技術

パルス発振固体レーザーを光源とするレーザーアニリング装置を使った、ラテラル結晶化技術，ALCG (Advanced Lateral Crystal Growth) 法を開発した。ALCG法は、ダブルパルスレーザーの照射により大きく成長させたラテラル結晶を、長尺ビームの簡便な重複走査によって連続的に成長させる手法である。

ダブルパルスレーザーの1ショット照射によってガラス基板上のa-Si薄膜が溶融して結晶成長する状態を、図3に示す。a-Si薄膜には、細線ビームの短軸方向のエネルギー密度分布を反映して、中心部の完全溶融領域とその両側に部分溶融領域ができる。部分溶融領域では基板との境界付近に結晶核が存在し、時間の経過とともに結晶核から結晶粒が成長する。結晶サイズは、結晶核の密度に依存する。結晶核が多く存在すれば結晶粒は小さくなり、少なれば結晶粒は大きくなることから、結晶核が最も疎な完全溶融領域との境界付近で最大の結晶粒が形成される。この結晶粒が種結晶となって、固液界面を通して融点以下の過冷却融液の方に潜熱を逃しながら中心に向かってラテラル方向に成長する。さらに冷却が進行すると、残存する過冷却融液中にランダムに発生した核から結晶粒が成長し、ラテラル成長は停止する。図4には、1ショット照射によって形成された結晶のSEM像を示す。

ALCG法による連続ラテラル成長のプロセスを、図5を使って説明する。ダブルパルスレーザーの第1ショットでは、図4のSEM像に示すように細線ビームの短軸中央方向に向かって成長した4 μm以上の長さの結晶組織が、長尺方向に帯状に形成される。第2ショットでは、第1ショットで形成された帯状の結晶組織の幅より短いステップ幅だけビーム位置をずらして照射する。第1ショットで形成された前方の帯状組織やビーム中央のランダムに形成された結晶粒は、溶融に十分なエネルギー密度で照射され消滅する。一方、第1ショットで後方に形成された帯状結晶は低いエネルギー密度で照射されることから残存し、種結晶となってレーザービームの走査方向に向かってさらにラテラル方向に成長する。これを繰り返すことにより第1ショットで形成された種結晶粒はラテラル成長を続け、連続した結晶からなるポリシリコン薄膜を得ることができる。

ALCG法(第1および第2パルスのエネルギー密度 $E_1 = 725 \text{ mJ/cm}^2$ & $E_2 = 650 \text{ mJ/cm}^2$ 、遅延時間 = 900 ns)で細線ビーム(20(W)μm × 17(L)mm)を4 μmステップ幅で重複走査して連続的にラテラル成長させたSi薄膜のSEM像およびAFM像を、図6に示す。拡大SEM像の連続した結晶粒界が示すように、ショット間(4 μmステップ走査)の継ぎ目でも結晶粒成長が途絶えることなく、連続して成長しているのが観察される。ALCG-Si薄膜の表面粗さrmsは、20 μm角エリアの評価で4.5 nmの値が得られ、従来のELA法により

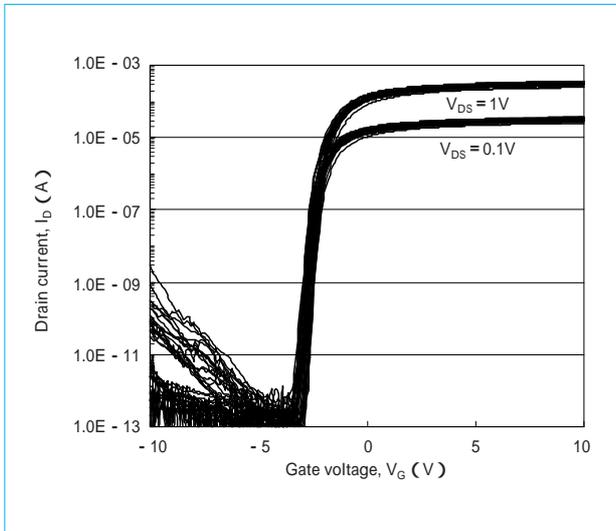


図7 n-チャンネルTFTのスイッチング特性
Gate transfer characteristics of n-channel TFTs for ALCG process

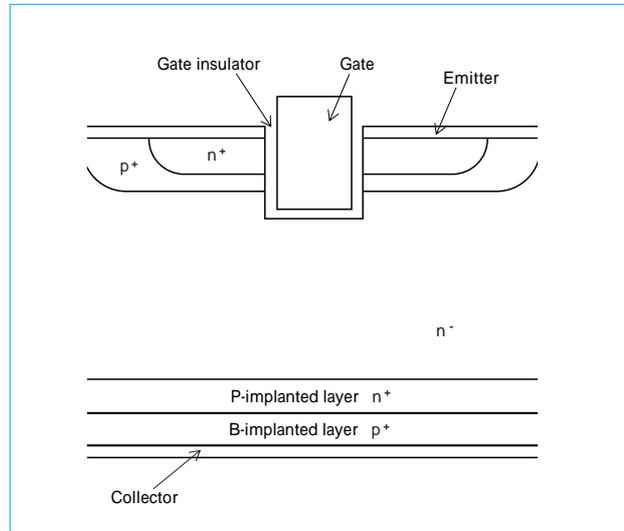


図9 一般的なIGBTの構造
Structure of typical IGBT

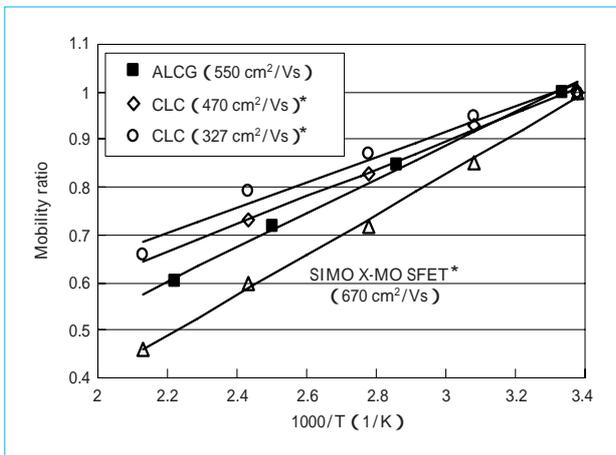


図8 各種トランジスタの移動度の温度依存性
Temperature dependence of normalized field effect mobility for various transistors

得られる多結晶Si薄膜の表面粗さに比べて半分以下に改善している。

3.2 ALCG-SiTFT特性

ALCG法で作成した多結晶Si薄膜の結晶品質を評価する目的で、nチャンネルALCG-SiTFT（チャンネル長/チャンネル幅 5 μm/5 μm）を高温プロセスで試作してその特性を調べた。TFT作成工程のゲート酸化膜形成およびソースドレイン（S/D）活性化などの結晶品質以外のプロセスでTFT性能が影響されるのを避けるべく、プロセスが確立している高温プロセスを採用した。なお、基板には石英ガラスを使用した。ALCG-SiTFTの電流を流す方向、すなわちチャンネルの方向はラテラル成長方向に対して平行と垂直両者を作製し方向性を評価した。図7に、一例としてラテラル成長方向に対して平行なnチャンネルTFTをランダムに20個選択し、スイッチング特性を測定した結果を示す。ドレイン電圧0.1Vのスイッチング特性から相互コンダクタンスを求め、電界効果移動度を計算した。ALCG-Si薄膜の結晶品質の指標となるALCG-SiTFTの移動度は、電流が結晶粒界に平行に流れる場合、単結晶に近い1600 cm²/Vsレベルに達する。他方、電

流が結晶粒界に直行して流れる場合、その1/3の200 cm²/Vs程度となる。この移動度の違いは、結晶粒界でのキャリア散乱によるものである。また、別に作製したpチャンネルALCG-SiTFT（チャンネル長/チャンネル幅 10 μm/10 μm）は、電流が結晶粒界に平行に流れる場合190 cm²/Vs程度、垂直の場合120 cm²/Vs程度の移動度が得られている。移動度の温度特性からnチャンネルALCG-Si薄膜の結晶品質を評価した結果を、図8に示す。比較検討を目的に、単結晶MOS（Metal Oxide Semiconductor）トランジスタとCW固体レーザーで作成した高移動度のCLC-SiTFTの移動度の温度変化も引用している。移動度の高いTFTほど、その温度特性は単結晶MOSトランジスタに近い。電流が結晶粒界に平行な場合、結晶粒界による散乱の影響が少ないことからキャリアの散乱機構の中でフォノン散乱が支配的となっていると考えられる。以上の結果より、ALCG-Si薄膜は結晶性に方向性があるものの、単結晶並みの結晶品質を有することを示している。

4 半導体への適用（IGBTデバイスのpn接合形成）

パワーデバイスには、高動作周波数・低出力容量のMOSFET、低動作周波数・高出力容量のGTOサイリスタ（Gate Turn-off Thyristor）と中動作周波数・中出力容量のIGBTがある。IGBTは動作周波数ならびに出力容量の両立が可能であることから、パワーデバイスの主力となっている。IGBTは、従来エピタキシャルウエハに作製されてきた。エピタキシャルウエハを用いると素子の薄型化が難しく、さらにこのウエハは高価であることからフローティングゾーン（FZ）ウエハへの置き換えが進んでいる。FZウエハを用いる場合、従来はエピタキシャル膜で作製していたpn接合をイオン注入と活性化アニーリングで形成することが要求される。ここで、図9に一般的なIGBTの構造を示す。IGBTは、ゲートおよびエミッタ側の面（こちら側を表面とする）を作製した後にコレクタ側（裏面）の工程に入る。裏面では所定の条件でボロン（B）とリン（P）のイオン注入を行った後に活性化アニーリングを行い、裏面から深さ2 μm程度の間pn

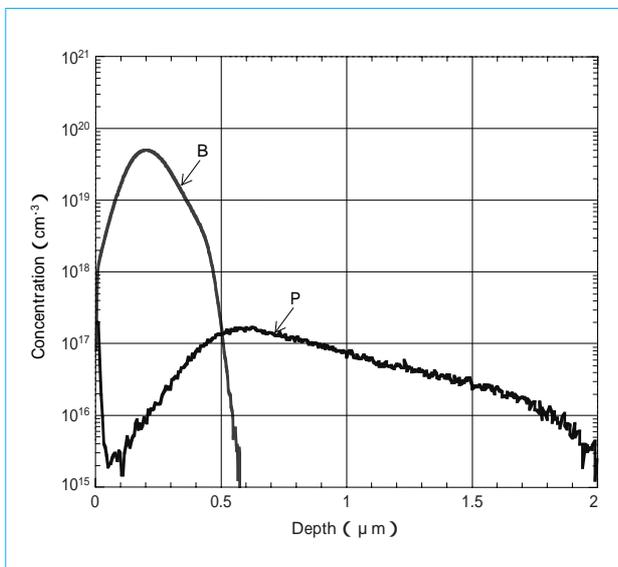


図10 BならびにPイオン注入直後のSIMS濃度分布
As-implanted SIMS depth profiles of B- and P-implant layers

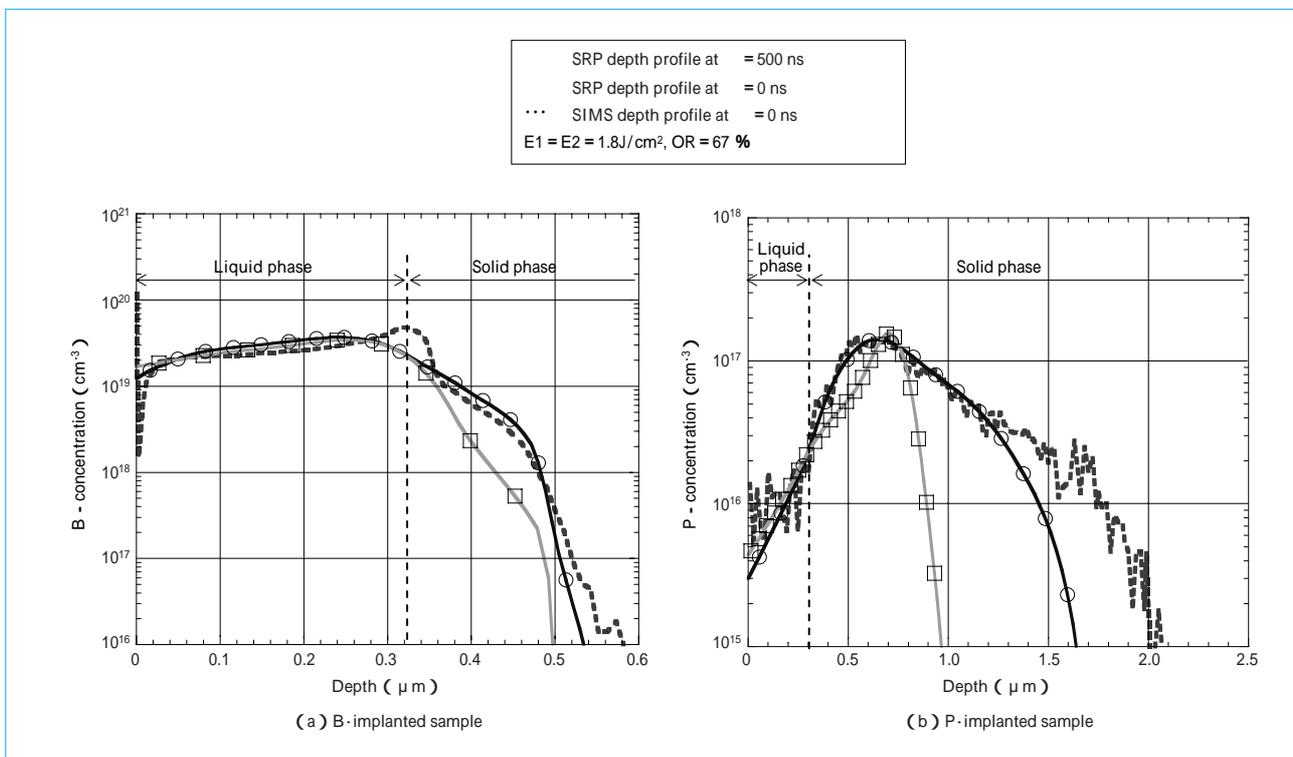


図11 ダブルパルスレーザーアニーリング後のSIMS並びにSRP分析結果
SIMS and SRP depth profiles after double-pulse laser annealing

接合を形成する。この活性化アニーリングによってシリコンウエハに注入された不純物原子（ここではBやP）をSi原子の格子位置に置換し、電流の担い手であるキャリアを発生させる。ここで重要なのは表面には低融点材料であるアルミニウムの配線があることから、表面に熱ダメージを与えられない。したがって、従来の電気炉などのウエハ全体を加熱する活性化アニーリングは低温熱処理であることから高い活性化は難しく、表面を熱することなく裏面のみを活性化する低サーマルバジェットのアニーリング技術が求められている。

2 μmもの深い活性化を行うには、単結晶Siの光侵入長がある程度長い波長のレーザー光が望ましい。このレーザー光源として、産業用途で広く使われている、光侵入長がおよそ1 μm

と長い、波長500 nm近辺のパルスレーザー光を出力できる半導体励起固体レーザーを採用した。このレーザーを搭載したダブルパルスレーザーアニーリング装置を用いて、低サーマルバジェットで2 μm程度の深い活性化の可能性を検証するべく照射テストを行った。まず、面方位が(100)のSiウエハに注入エネルギー40 keV、ドーズ量 $1 E + 15/cm^2$ でBイオンを注入したサンプルと注入エネルギー400 keV、ドーズ量 $1 E + 13/cm^2$ でPイオンを注入したサンプル、BとPの両方をイオン注入したサンプルを用意した。このサンプルに、第1パルスのエネルギー密度(E1)を $1.8 J/cm^2$ 、第2パルスのエネルギー密度(E2)を $1.8 J/cm^2$ 、重複率(OR)を67%、遅延時間()を0 ns, 300 ns, 500 nsとしてダブルパルス照射

を行った。照射したB注入サンプルとP注入サンプルの深さ方向の不純物濃度分布とキャリア濃度分布を測定するべく、2次イオン質量分析(SIMS)と拡がり抵抗測定(SRP)をそれぞれ行った。図10にBとPを注入したサンプルの不純物濃度分布、図11にB注入サンプル、図11にP注入サンプルのレーザー照射後の不純物濃度分布ならびにキャリア濃度分布を示す。SRPのキャリア濃度分布がSIMSの不純物濃度分布に近いほど、活性化アニーリングにより注入した不純物を効率的にキャリアにすることができる。なお、この不純物濃度とキャリア濃度の百分率を活性化率と呼ぶ。図11のSIMSのB濃度分布では深さ0.3 μm 付近に濃度が局所的に高い部分があるが、これは活性化アニーリング時にこの深さまで溶解した痕跡であると考えられる。この溶解深さより浅い領域ではキャリア濃度分布は典型的なボックスプロファイルでSIMSのB濃度分布とほぼ重なっており、高い活性化率を示している。遅延時間を0 ns(言い換えるとシングルパルス照射)から500 nsとすることで、活性化率が91%からほぼ100%になった。一方、0.3 μm よりも深い固相領域におけるP注入層の活性化では図11に示すように遅延時間の効果が顕著に出ており、遅延時間を0 nsから500 nsとすることで活性化深さ(注)が1.1 μm から1.8 μm まで深くなり、活性化率が48%から82%まで著しく改善された。その活性化プロセスは、2段階の再結晶化プロセスから成る。まず、溶解していない0.3 μm より深い固相領域のアニーリングにより欠陥が追い出され単結晶に回復する。次に、これよりも浅い溶解(液相)領域では単結晶に回復した固相領域を種結晶としてエピタキシャル成長する。一般的に、固相エピタキシャル成長による結晶回復はアニーリング温度と時間によって決まる。つまり温度が高いほど単結晶の回復が短時間で起こり、他方融点より低い温度では長い熱処理時間で単結晶に回復する。パルスレーザーアニーリングは高温かつ極短い時間の熱処理技術、すなわち低サーマルバジェットの活性化技術と言える。図2には、エネルギー密度と重複率を固定して遅延時間を0 ns~500 nsと変化させてSiウエハにダブルパルス照射を行ったときのアニーリング温度の時間変化が示されている。遅延時間を0 nsから500 nsに延ばすことでピーク温度は低下するが、その分より長い時間アニーリング温度を維持できる。シングルパルスではダブルパルスのようにアニーリング温度と時間を制御できないことから、結果としてアニーリング時間が短く活性化深さが浅くなってしまったと考えられる。

アニーリング温度と時間を高精度に制御することができる半導体励起固体レーザーを搭載したダブルパルスレーザーアニーリング装置を用いて、IGBTに要求される表面側のパターンに熱ダメージを与えることなく高い活性化率を持つ深いpn接合の形成に成功した。

5 むすび

ダブルパルスを用いた固体レーザーアニーリング装置を開発し、本装置を用いて液晶および半導体プロセス開発を実施した。

液晶の結晶化プロセスにダブルパルス照射を適用し、細線ビームの簡便な重複走査によりラテラル結晶を連続的に形成できる新プロセスを開発した。本結晶を用いて

nチャンネルTFTを試作した結果、単結晶の特性に迫る600 cm^2/Vs レベルの高移動度が得られた。

高性能パワートランジスタIGBTの裏面活性化プロセスにダブルパルス照射を適用し、素子表面に熱ダメージを与えることなく裏面にB注入層(活性化深さ0.6 μm 、活性化率100%)とP注入層(活性化深さ1.8 μm 、活性化率82%)から成るpn接合を形成することができた。

今後は装置の高スループット化と、更なるアプリケーションの開拓をしていく予定である。

(参考文献)

- T.Kudo and N.Wakabayashi. Materials Research Society Proceedings. vol.912, 2006 (to be published).
- S. Uchikoga. MRS Bulletin 27. p.881, 2002.
- J. S. Im and R. S. Sposili. MRS Bulletin 21. p.39, 1996.
- A. Hara, F. Takeuchi, M. Takei, K. Suga, K. Yoshino, M. Chida, Y. Sano and N. Yoshino. AM-LCD'02. p.227, 2002.
- M. Hatano and T. Shiba. SID 02 DIGEST. p.158, 2002.
- K. Tamagawa, H. Ikeda, T. Ohnishi, K. Kuwahara, M. Kikuchi, M. Hayama and K. Nakamura. IDW'03. p.585, 2003.
- D. S. Knowles, J-Y. Park, C. Im, P. Das, T. Hoffman, B. Burfeindt, H. Muenz, A. Herkommer, P. C. van der Wilt, A. B. Limanov and J. S. Im. SID 05 DIGEST. p.503, 2005.
- T. Kudo, K. Yamazaki and T. Akashi. IDW'04, p.619, 2004.
- K. Yamazaki, T. Kudo, K. Seike, D. Ichishima and C. G. Jin. AM-LCD'02 Digest, p.149, 2002.
- S. Sakuragi, T. Kudo, K. Yamazaki and T. Asano. IDW'05, p.965, 2005.
- K. Yamazaki, K. Seike and T. Kudo. CLEO/Europe EQEC'05 Conference Digest, CM-5, 2005.
- F. F. Fang and A. B. Fowle. Phys. Rev. 169, p.619, 1968.

(注) 注入した不純物イオンによるp型(n型)キャリアとシリコンウエハのn型(p型)キャリアの濃度が反転するSRPプロファイルの深さを、活性化深さと定義する。

重粒子線がん治療装置用小型入射器の開発

Development of Compact Injector for Heavy-ion Cancer Therapy System

密本俊典* 筒井裕士** 岩田佳之*** 山田 聰***
Toshinori MITSUMOTO Hiroshi TSUTSUI Yoshiyuki IWATA Satoru YAMADA



重粒子線がん治療装置用小型入射器
Compact injector of heavy-ion cancer therapy system

近年、重粒子線によるがん治療の有効性が確認され、がん治療の有力な手段となっている。この優れた治療法の普及には、装置の小型化が必要である。

この装置の入射器部分の改良について、独立行政法人放射線医学総合研究所と共同で開発を行い、製作を請け負った。入射器部分はイオン源、二つの線形加速器 Radio Frequency Quadrupole (RFQ) と Drift Tube Linac (DTL) で構成されるが、そのDTLにIH加速構造とAPF収束構造を採用し、最適化した設計を行った。イオンビームの加速試験を行い、炭素イオンを核子あたり4MeVまで加速し、必要な性能を確認した。二つの方式を同時に採用した実用的なDTLは世界でも初めてであり、これにより装置の大幅な小型化が達成された。

Recently, heavy-ion therapy has proved effective in cancer treatment and become an important means of treating the disease. To expand the spread of this excellent treatment technique, it is necessary to reduce the size of the system. We have developed and produced a new injector for this system in cooperation with the National Institute of Radiological Sciences in order to improve the injector for the system. The injector consists of an ECR ion source and two linacs: RFQ and DTL. For DTL, we adopted the IH acceleration structure and the APF focusing structure, and created designs for their optimization. We conducted an acceleration test with ion beams and accelerated carbon ions to 4.0 MeV/nucleon to identify the required performance. This is the world's first practical DTL adopting the two methods at the same time. Its development enabled us to drastically downsize the system.

1 まえがき

重粒子線によるがん治療は独立行政法人放射線医学総合研究所（放医研）の重粒子線治療装置によりその有効性が確認されてきている。2003年10月には高度先進医療として厚生労働省から承認され、がん治療の有力手段となっている。2006年2月までに2600以上の症例の治療を行い、優れた治療効果が示された。

重粒子線によるがん治療は炭素イオンビームを用いた放射線治療の一種であるが、X線による治療に比べると、がん細胞だけに集中的に線量を当てることができ、正常細胞の損傷を最小限に抑えることが可能な治療法である。また、がん細胞を殺傷する能力が強く、他の放射線療法では治療困難であった放射線抵抗性のがんにも効果が見られる。さらに、手術

をする必要がないということは、患者の負担を軽減することになり、通院だけで治療することも可能となっている。このことはQOL（Quality Of Life）の高い治療法であることを示している。

このように優れた治療法ではあるが、治療装置が大規模で、高価であるという点がこの治療法の普及の問題点である。例えば放医研の重粒子線治療装置では、約70×120 mの敷地と250億円の建設費が必要であった（図1）。現在、重粒子線によるがん治療ができる施設は国内には放医研と兵庫県粒子医療センターの2箇所にしかない。重粒子線による治療を普及させるには、治療装置をもっと容易に建設できるよう小型化することが必要となる。

重粒子線治療装置は、入射加速器部分、シンクロトロン加速器部分および照射装置部分で構成されている。放医研では、

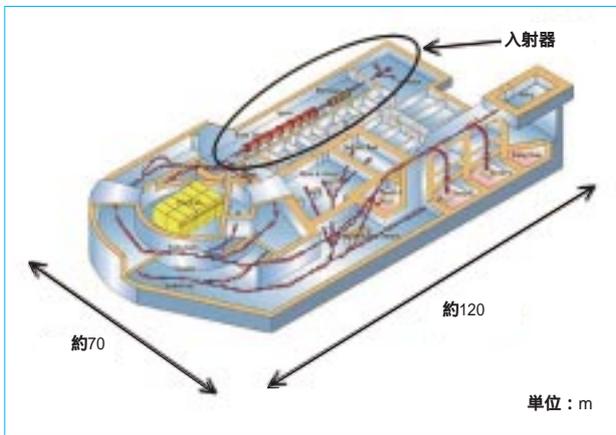


図1 放医研の重粒子線治療装置
Heavy-ion cancer therapy system at National Institute of Radiological Science

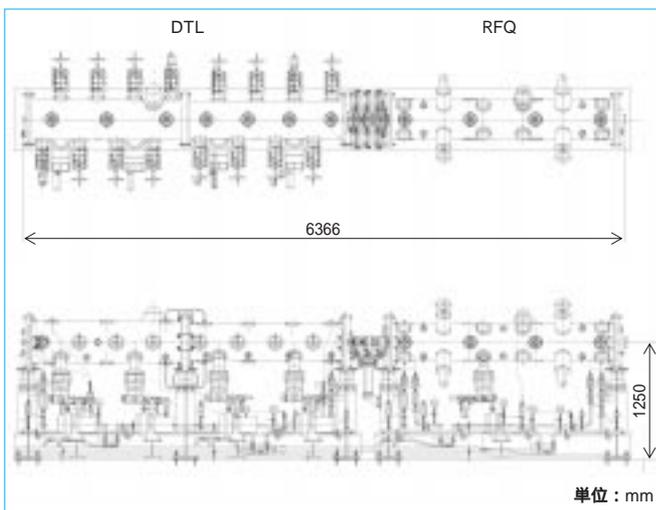


図2 がん治療装置用入射器
Injector of heavy-ion cancer therapy system

入射器の小型化を重要課題として取り組んできた。当社は、普及に向けた小型入射器の開発を放医研と共同で行い、その製作を請け負った(図2)。

2 設計

2.1 加速方式の選択

入射器部分に要求される性能は炭素イオンを核子あたり4.0 MeVのエネルギーで、200 μ Aの電流量をシンクロトロンに入射できることである。この実現に、RFQ (Radio Frequency Quadrupole) およびDTL (Drift Tube Linac) という二つの線形加速器を用いた。本開発では、DTLについてその加速構造にIH型 (Inter-digital H structure)、収束方式にAPF (Alternating Phase Focusing) という方式を採用し、入射器全体の小型化を目指した。表1に、RFQとDTLの主要パラメータを示す。

2.2 DTLの設計

DTLはドリフトチューブという電極を共振器内に並べた構造をしており、その中心にイオンビームを通すことにより効率的な加速を実現する線形加速器である。DTLは加速効率においては優れているが、それ自身ではビームを収束させる機能を有していないので、ドリフトチューブ内に4重極

表1 RFQおよびDTLの主要パラメータ
Major specifications of RFQ and DTL

	RFQ	DTL
入射エネルギー (MeV/u)	0.010	0.61
出射エネルギー (MeV/u)	0.61	4.0
RF周波数 (MHz)	200	200
質量荷電比	1/3	1/3
共振器長さ (m)	2.5	3.4

磁石を入れるなどして磁場で収束力を確保するか、線形加速器を短くしてイオンビームが発散する前に取り出す必要がある。これまで一般的に使われてきたアルバレ型と呼ばれるDTLでは、4重極磁石を使用する方法が一般的であった。

アルバレ型に対してIH型という加速構造は、核子あたり数MeVのエネルギー範囲では、DTLの中でも小型で加速効率が良いことが知られていた。IH型は、共振器内にリッジと呼ばれる板を対向するように置き、ドリフトチューブはその対向するリッジから交互に支えられる構造である。しかしながらこの構造を採用するにはドリフトチューブ内に設置する4重極磁石を極めて小型化する必要があるが、あまり実用化されてこなかった。

そこで、この問題点を解決するべくAPF方式という収束方式を採用することとした。APF方式はイオンビームの加速する高周波の位相をギャップごとに変えて、電場によりビームの収束力を確保する方式である。この方式を採用することにより、収束用の4重極磁石をドリフトチューブ内に設置する必要がなくなり、IH型の利点を最大限利用する設計が可能となった。

DTLの加速構造にIH型、収束方式にAPF方式を採用するにあたっては、解決しなければならない問題点があった。APF方式では、ギャップ間の電圧分布の設計を従来の線形加速器より高い精度で実現しなければならないが、IH型の加速構造では、電圧分布の設計がアルバレ型に比べて難しいということである。また、APF方式についてはその原理は1950年代から知られていたが、最適化の方法が確立されていなかったことから実用機として製作されたものがなかった。

そこで、電場分布の設計には、商用の3次元電磁場解析コードを使用し、また、イオンビームの軌道計算と最適化に、新たに計算コードを開発した。

3次元電磁場解析コードについては実機の設計に先立ってモデル共振器を作成し、その計算精度がどの程度かを確認し、実機設計に充分適用できるものであることを確認した。軌道計算については、理論的な位相配列を初期条件とし、透過率を最大で、かつ出口でのビームエネルギー幅とエミッタンスを小さくするような解を、各パラメータを少しずつ振ることにより求めていった。そして電磁場計算と軌道計算を繰り返すことにより、相互に満足できるような最適構造を決定していった。

実際のギャップ間電圧分布の決定に際しては線形加速器内での放電を防ぐべく共振器表面での最大電界 (24 MV/m) を決め、これを越えることがないような構造としている。また、必要な電圧分布を得るべく、従来円筒形が一般的であった共振器構造にテーパを付けて、入射側から出口側に向かって広がっていく構造を採用した。ドリフトチューブについても、

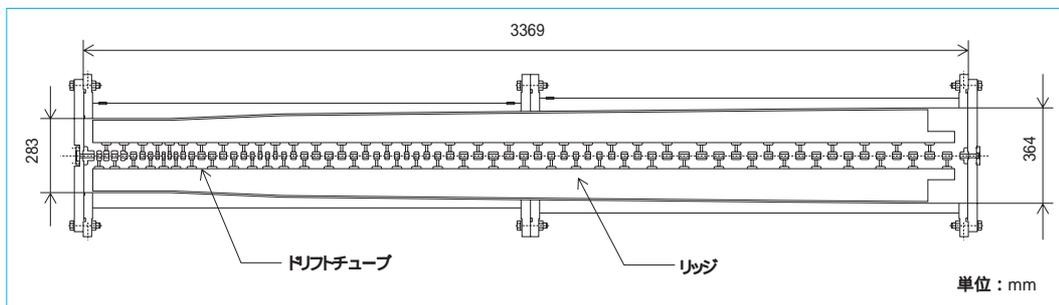


図3 DTLの断面
Cross-sectional view of DTL



図4 RFQ内部
Internal view of RFQ

外径を38 mm, 30 mmおよび28 mmの3種類を使用し,ドリフトチューブ間の静電容量を段階的に調整することとした。

DTLの断面図を, 図3に示す。直径で約400 mm, 全長3.4 mと小型ながら, 炭素イオンを核子あたり4 MeVまでの加速を可能としている。一つの共振器内に72個の加速ギャップを有しながら, 磁氣的収束要素なしで加速する構造を実現した。

2.3 RFQの設計

DTLの前段にあたるRFQは, DTLの条件に合わせて最適化された構造としている。RFQはイオン源からの直流イオンビームをDTLでの加速に適するように縦横の収束力を維持しながらビーム形状を整形し, DTLの入射エネルギーまでイオンを加速する。構造的には四つの電極により, 4重極電場を作り, その先端部分にモジュレーションを付けることによりパンチ化と加速を実現する。RFQの構造については, 実績のある4ペイン型を採用した。

RFQへの入射エネルギーは, 核子あたり10 keVとした。炭素4価イオンを使用するので, イオン源部分の電位は30 kVで良く, 取り扱い易い電圧に収めている。このことから, イオン源から引き出したイオンビームをそのままRFQに入射することができ, RFQ入射側部分についても構造を単純化させることができる。

3 製作

3.1 加速器の製作

RFQとDTLについては, 基本構造は同じとしている。共



図5 DTL内部
Internal view of DTL

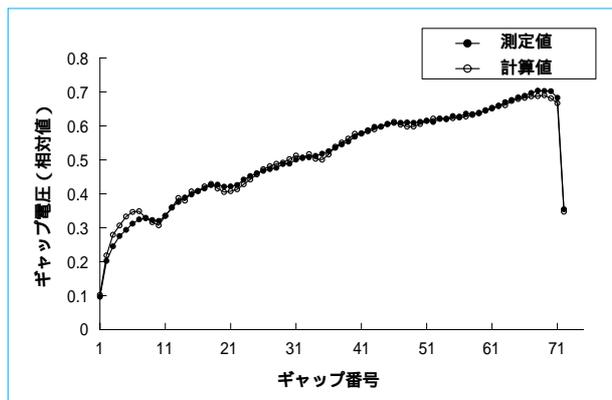


図6 DTLギャップ電圧分布
Gap-voltage distributions of DTL

振器の直径はどちらも300 mm程度であり, 鉄のタンクの内面に50 μmの銅メッキを施してある。RFQ, DTLの長さはそれぞれ2.5 m, 3.4 mである。長さの違いから, 共振器はRFQでは1タンク, DTLでは2タンクの接続構造としている。RFQのペイン, DTLのリッジは鍛造された無酸素銅を使用, タンク外部のフランジで位置を調整するようになっており, 高精度でペイン, リッジのアライメントができる。また, 高周波コプレー, チューナおよびピックアップなどもRFQとDTLで基本的に同じ構造を採用している。図4, 図5に, RFQ, DTLの内部の様子を示す。

3.2 高周波源の製作

RFQおよびDTLで電圧を発生させる高周波源の製作も同時に行った。周波数200 MHzでそれぞれ200 kW, 500 kWを発生させることのできるものである。高周波源の中間段, 最

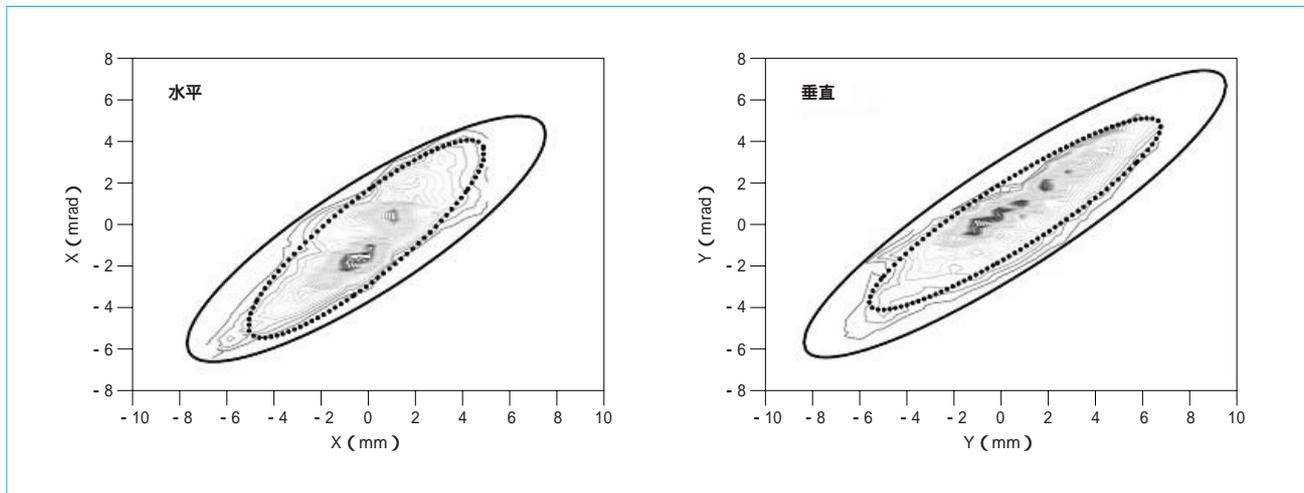


図7 $^{12}\text{C}^{4+}$ ビームのエミッタンス 90%エミッタンス (破線), 100%エミッタンス (実線)
Emittance of $^{12}\text{C}^{4+}$ beam 90% emittance (Dotted line), 100% emittance (Solid line)

終段アンプには4極管を使用し、この高い出力を実現している。また、この入射器の2台の線形加速器は連動運転させる必要性があり、それぞれの線形加速器に発生する高周波電場の大きさと位相を制御し、一定に保つような制御システムを有している。

4 試験

4.1 高周波試験

RFQおよびDTLは当社においてまず低電力の高周波試験を行い、周波数、電圧分布を調整した。その結果、周波数については設計値どおりの200 MHz、電圧分布についても必要な精度の分布が得られた。図6に、DTLの電圧分布測定の結果を示す。入射側の5ギャップを除き、全体の電圧分布は $\pm 2\%$ の範囲に収めることができた。入射部分の電圧のずれについては、軌道計算によりDTLの性能に大きな影響を与えないことを確認した。共振器の性能を表す無負荷Q値は、RFQ、DTLについては、それぞれ7800と12000で理想状態での計算値の60%と80%であった。設計値ではそれぞれ60%と70%を想定していたので、DTLについては設計値を10ポイント上回った値が得られた。

その後、高周波源を接続し、高周波の入力試験動作の確認を行った。大電力高周波の最初の入力段階では、マルチバクタリング放電が発生し、定格の入力までは月単位の時間が必要な場合があるが、今回開発のRFQおよびDTLでは5日以内に定格の電圧を発生させることができ、きわめて短期間に立ち上げることができた。

4.2 加速試験

基本的な性能の確認後、RFQおよびDTLは放医研のサイクロトロン棟汎用照射室に据え付けられ、イオン源と組み合わせた加速試験を行った。イオン源は、放医研で開発された永久磁石型ECRイオン源を使用した。加速イオンは、実際に使用される炭素の4価イオンとした。電流値とビームの質を表すエミッタンスはDTL後方に置かれたファラデーカップ電流検出器とエミッタンス測定装置でなされ、エネルギーはさらにその後方に置かれた分析電磁石によりイオンビームを偏向させて測定した。

この試験の結果、RFQに入射した炭素イオンビームの約80%をDTLの後方で確認することができた。また、エネルギーは設計値である核子あたり4 MeVであることを確認できた。ビーム電流については4価で300 μA 以上の電流量を安定に得られており、必要な性能を実証することができた。エミッタンスについては90%エミッタンスで水平、垂直とも1.1 mm \cdot mradが得られ、計算値と良い一致がみられた(図7)。

5 むすび

重粒子線がん治療装置に使用する入射器の開発を行い、RFQおよびDTLの二つの線形加速器を製作した。

この二つの線形加速器を据え付け、ビーム試験を行いがん治療装置の入射器としての必要な性能を確認した。

入射器部分の長さはイオン源を含めて約10 mであり、放医研の重粒子線治療装置の40 mと比較すると1/4ほどに短縮された。

この入射器のDTLでは、IH加速構造とAPF収束構造を採用した世界で初めての実用機であり、世界でもトップレベルの技術を実用化した。

この開発により、重粒子線がん治療装置の入射器部分が小型化されることになり、この装置の普及に大きく貢献することが期待される。

(参考文献)

- M. L. Good, Phys. Rev., p.538, 1953.
- Y. Iwata, S. Yamada, T. Murakami, T. Fujimoto, T. Fujisawa, H. Ogawa, N. Miyahara, K. Yamamoto, S. Hojo, Y. Sakamoto, M. Muramatsu, T. Takeuchi, T. Mitsumoto, H. Tsutsui, T. Watanabe and T. Ueda. Alternating-Phase-Focused IH-DTL, Nucl. Instrum. and Meth. of Phys. Res. A. (accepted).
- M. Muramatsu, A. Kitagawa, Y. Sakamoto, S. Sato, Y. Sato, H. Ogawa, S. Yamada and A. G. Drentje. Rev. Sci. Instrum., 76, 113304, 2005.
- Y. Iwata, T. Fujisawa, T. Furukawa, S. Hojo, M. Kanazawa, N. Miyahara, T. Murakami, M. Muramatsu, K. Noda, H. Ogawa, Y. Sakamoto, S. Yamada, K. Yamamoto, T. Mitsumoto, H. Tsutsui, T. Ueda and T. Watanabe. Alternating-Phase-Focused IH-DTL for heavy-ion medical accelerators. Proceedings of European Particle Accelerator Conference (EPAC'06), Edinburgh, UK, 2006.

理研中間段リングサイクロトロンの高周波システム

RF System for RIKEN Intermediate Ring Cyclotron

戸内 豊*
Yutaka TOUCHI



理研IRC
RIKEN IRC

当社では、長年サイクロトロンの製作に携わってきた。現在当社の柱となったPET (Positron Emission Tomography) もサイクロトロンを利用した技術応用の一環である。

本報では、現在独立行政法人理化学研究所に建設中の大型サイクロトロンシステムを紹介し、中間段リングサイクロトロンの高周波加速システムについて解説する。

高周波加速システムは、イオンを加速する共振器（加速空洞）、共振器に電力を供給する増幅器、共振器の電圧および位相を制御するRF制御システムから構成される。それぞれの機器に当社の特許や優れた技術が生かされており、その概要を紹介する。

We have been engaged in the production of cyclotrons for many years. PET (Positron Emission Tomography), which has now become the core business of our company, is one of the technological applications using the cyclotron. This report introduces a large-scale cyclotron system currently being built at RIKEN, and describes an RF acceleration system for the intermediate ring cyclotron. The RF acceleration system consists of a resonator (acceleration cavity), which accelerates ions, an amplifier, which supplies electric power to the resonator, and an RF control system, which controls the voltage and phase of the resonator. The report also introduces an overview of these components.

1 まえがき

独立行政法人理化学研究所（理研）では、1997年から2006年までの計画で水素からウランまでの全ての元素のRI (Radio Isotope) 生成が可能な加速器システム (RI Beam Factory計画 RIBF) の整備を進めている。このシステムを使って新しい原子核モデルの構築および元素の起源の解明といった根源的な研究に合わせて、新しいRI技術による新産業の創出も期待されている。この計画では現在稼働中の重イオン加速器システムに加え、新たに3機の大型リングサイ

クロトロンが建設される。計画の設備全体を、図1に示す。当社は、稼働中のAVF (Azimuthally Varying Field) サイクロトロン、理研リングサイクロトロン (RIKEN Ring Cyclotron RRC) に加え、中間段リングサイクロトロン (Intermediate Ring Cyclotron IRC)、ウラン加速専用のリングサイクロトロン (Fixed frequency Ring Cyclotron FRC) の建設を担当した。また、最終段のサイクロトロン (Super conducting Ring Cyclotron SRC) のマグネットや真空箱を除いた高周波システムは当社が担当している。本報では、現地での据付けおよび調整試験が完了したIRC (冒頭の図) の高周波加速

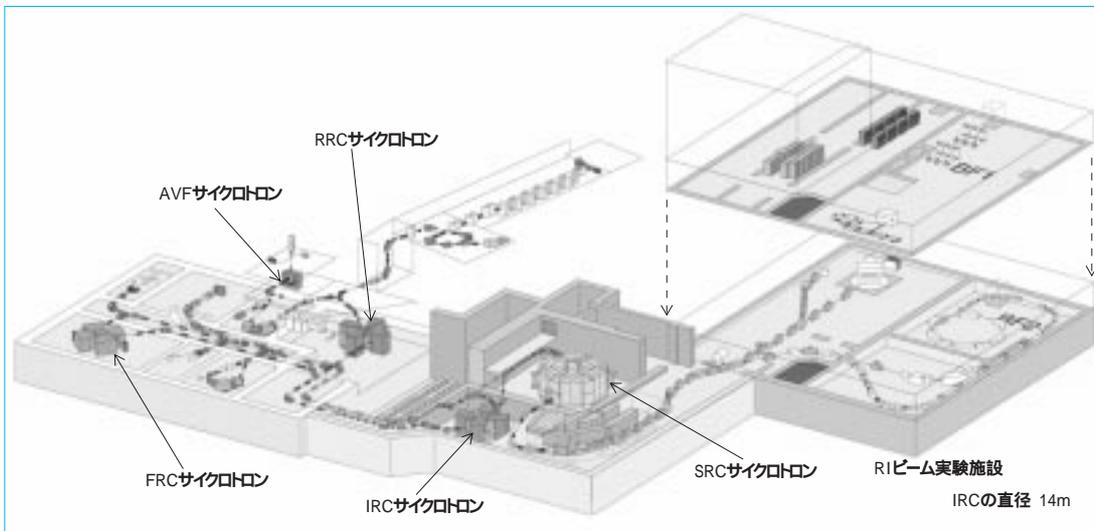


図1 RIBF計画
RIBF project

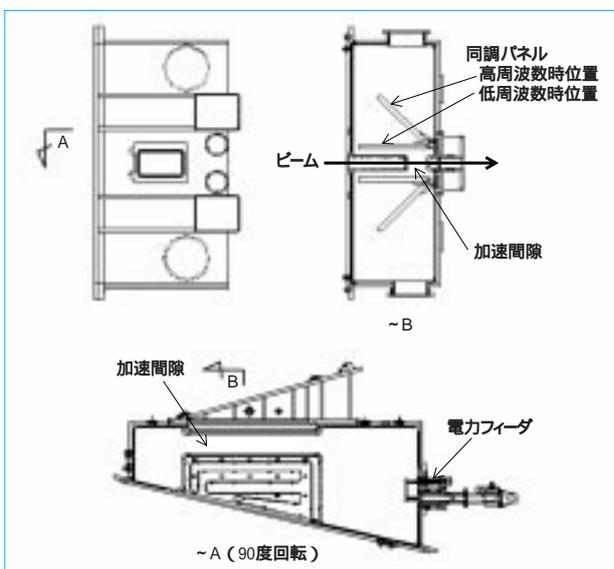


図2 主共振器
Main resonator

システム についての報告を行う。

サイクロトロンの概要について述べておく。サイクロトロンとは、イオン加速器の一種である。加速器の性質を大きく分類すると、下記の様になる。

- 線形/円形
- 直流加速/高周波加速
- 固定磁場/可変磁場

サイクロトロンは、円形、高周波および固定磁場を利用した加速器に属する。それぞれに一長一短があるが、サイクロトロンはコンパクトで高いエネルギーまでイオンを加速できる装置である。最近では、学術目的以外にがん診断用RIの製造および陽子線がん治療などに利用されている。

2 IRCの高周波システム

2.1 加速空洞

サイクロトロンは、高周波を利用した加速器の一種である。イオン源で生成されたイオンは、加速空洞を通るたびにエネルギーを受け取り、速度(質量)を上げていく(加速される)。

効率よく加速するには、少ない電力で高い加速電圧を発生する加速空洞を作ることが必要である。また多種のイオンを加速するには、加速空洞にかかる電圧の繰返し(周波数)をイオンごとに調整することも必要となる。

少ない電力で高い電圧を得る指標に、Q値という特性値がある。高いQ値を得るには、空洞で消費される電力(壁面損失)を小さくするとともに、蓄えられるエネルギーを大きくする必要がある。エネルギーは、 CV^2 と LI^2 という形で蓄えられる。ここでCは加速空洞の容量成分、Lは加速空洞のインダクタンス成分を意味する。LとCの組み合わせにより加速空洞の共振周波数が決まる。壁面損失は電流の2乗に比例するから、上記のIを小さくしLを大きくすれば、Q値の高い空洞を得られることが予想できる。先端に発生する電圧は、 Ldl/dt と表わされることより、加速電圧もLが大きい方が大きく取れる。

共振周波数の調整構造は、リングサイクロトロンの場合一般的に1/2の同軸共振器が採用される。しかし周波数が低い場合、必要な長さが長くなり実現できなくなる。IRCの場合必要な周波数は18 MHz~40.5 MHzであり、単純計算で各々の場合の共振器長は8~4mとなってしまう。駆動機構を考慮するとこの値の約2倍の長さが必要となり、装置および建屋の建築コストを大きく引き上げる要因になる。

この問題を解決するべく同調パネル方式の共振器を提案し(国立大学法人大阪大学(阪大)と当社の特許)、阪大のリングサイクロトロンで採用され、理研IRCの加速空洞にも本機構が採用された。共振器の図を、図2に示す。

ビーム軌道平面近くに可動式のパネルを備え、このパネルと対向する電極とでつくるコンデンサ容量を変えることで共振周波数を調整している。この構造の採用で、機械構造を大幅に簡素化することができた。また、半径方向の電圧分布も外側で高くすることが可能であり、同軸型共振器よりも優れた特性を得ることが可能となった。

共振器には電力の供給に電力フィーダという装置が必要であるが、本共振器では磁界結合の電力フィーダを採用している。また、共振器は温度変化で機械寸法が変化し、共振周波数が変化してしまう。この周波数変動を抑えるべく密同調装置という装置も必要になるが、本共振器ではブロック型のチ

表1 共振器の主要仕様
Major specifications of resonators

	主共振器	フラットトップ共振器
台数	2	1
周波数 (MHz)	18 ~ 40.5	72 ~ 121.5
同調方式	パネル	ショート板
最大電圧 (kV)	600	140
Q値	37500	29300

図3 高周波系のブロックダイアグラム
Block diagram of RF control system

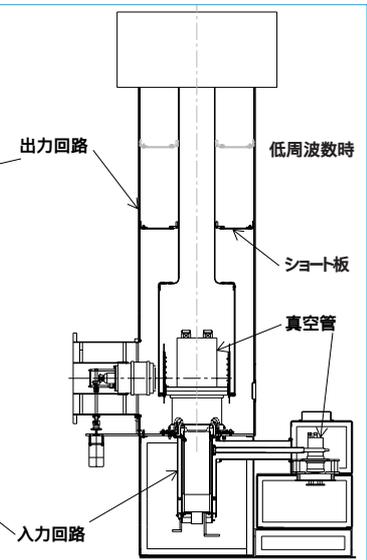
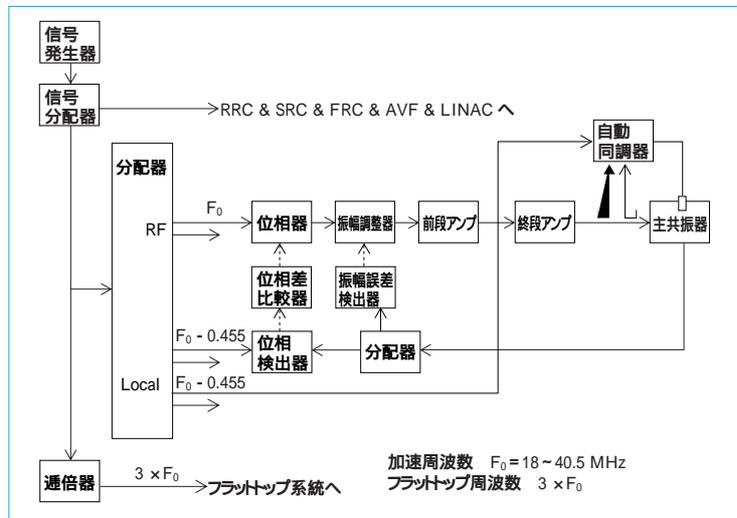


図4 増幅器
Main amplifiers

ューナを採用した。加速用の主共振器と主加速器の3倍の周波数で運転し、位相アクセプタンスを大きくするフラットトップ用共振器の主要仕様を表1に示す。

2.2 RF制御システム

サイクロトロンでイオンを加速するには、イオンが加速電極にある瞬間に高周波電圧がピークになるように制御する。この時、そのタイミングが不安定だとビームのエネルギー幅が大きくなり、ビーム取出し時のロスが増加する。したがって、電圧と位相(ビームと高周波の位相関係、サイクロトロン同士の高周波のタイミング)を高い精度で一定に保つことが必要不可欠である。それを実現するのが、RF (Radio Frequency) 制御システムである。ブロックダイアグラムを、図3に示す。

図3に、IRCの加速空洞用の1系統のみを示した。加速器は、信号発生器1台の信号を基本に運転される。この基準信号から必要な信号を分配して各系統に供給する。分配された信号は、基準の信号に対して時間的揺らぎ(ジッタ)や温度による位相変動があつてはサイクロトロン間の位相関係を安定に保てないことから、使用する素子の選定にも注意が必要になる。

分配された信号は、位相制御回路と電圧制御回路を経て共

振器に供給される。位相制御回路と電圧制御回路は、共振器の信号をモニタリングし、その値が設定値どおりに安定になるように制御する回路である。IRCの位相安定度は、0.1度を目標にしている。40 MHzの信号で位相0.1度に相当する伝送線路の長さは、わずか2 mmである。敷設するケーブル長が100 mを超えることを考えると、周囲に温度変化があつた場合の影響の大きさが予想できる。そこで、位相制御用の信号は周波数を変換(455 kHz)することにより制御精度の向上を図っている。

2.3 増幅器

イオンを効率よく加速するには、共振器に高い電圧を発生させる必要がある。その実現に、RF信号を増幅して共振器に供給する。

RFローレベル制御回路で取り扱う信号のレベルは、10 mWといった非常に小さな信号である。この信号を200 kWまで増幅するのが増幅器である。IRCのメインRFシステムの場合増幅器は、3段で構成している。1段目はトランジスタを使用した増幅器で、2段目、3段目には、現在では一部のオーディオアンプ位にしか使用しなくなった真空管を使用している。真空管といっても1本70 kgもある大きなものである。

真空管を動作させるには真空管に共振回路を持たせる必要

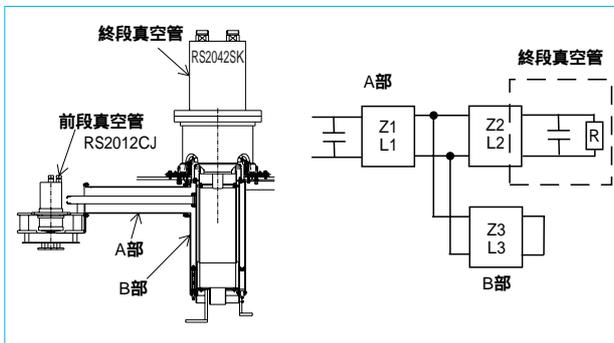


図5 終段増幅器の入力回路
Input circuit of final amplifier

があり、この共振回路の良し悪しがシステムの安定に大きく影響する。共振回路といえばコイル(L)とコンデンサ(C)を使用した回路を思い浮かべるが、この様に大きなシステム(寸法)で ~ 40 MHzの回路を実現するには、既に単独でのLやCといった概念は通用しない。回路は、空洞共振の考えで設計する必要がある。増幅器全体を、図4に示す。

2.3.1 終段増幅器入力回路

真空管(4極真空管)には、フィラメント電極、コントロールグリッド電極、スクリーングリッド電極およびプレート電極という四つの電極が存在する。

真空管を動作させるには入力信号用の同調回路と整合回路、増幅した信号を取り出す出力回路用の同調回路と整合回路が必要になり、各々に調整用の駆動装置が必要となる。

入力回路はフィラメント電極とコントロールグリッド電極との間に設置する回路であり、フィラメントから放出される熱電子を制御する役割がある。

IRCの増幅器の入力回路には、ダイレクトカップリングという斬新な構造が採用された。入力回路の構造と等価な電気回路を、図5に示す。前段の真空管と終段の真空管は直接接続され、前段の真空管からみると回路と並列に可変コンデンサが装着され、終段の真空管と並列に同軸回路が装着されたように見える。この構造の場合、インピーダンス整合回路を装着しなくても周波数が $18 \sim 40.5$ MHzで前段の真空管からみたインピーダンスをほぼ一定に調整することができる。つまり、前段アンプの出力同調回路、整合回路、それに終段入力の整合回路の合計3個の回路(駆動装置)を省略することが可能になり、コンパクトに納めることができた。

2.3.2 終段出力回路

出力回路はプレート電極とスクリーングリッド電極に接続する回路であり、真空管を必要な周波数で動作させ(同調をとる)、動作抵抗を調整(整合をとる)する回路である。IRCの終段出力回路は、オーソドックスな $1/4$ (波長)の同軸管方式を採用している。同調は、図4のショート板を上下に動かし調整する。出力回路の途中で内側のパイプ径が細くなっているが、このような構造にすることで波長を短縮させ必要な回路長を短くしている。

整合をとるには、真空可変コンデンサという高電圧下でも使用可能なコンデンサの容量を変化させ、真空管の動作抵抗を調整している。

共振回路には、必要としているモードの他にもいろいろな

共振モードがある。これらの周波数が、必要としている周波数の整数倍に重なるとその周波数で増幅動作し、不必要な周波数成分が増え波形が歪んでしまう。ひどい場合は制御不可能になり、発振という現象を引き起こす。回路設計時は必要な周波数の計算の他にも想定されるモードの計算も行い、基本周波数の高調波が他のモードと共振しないことを確認しておく。

発振には、上記の現象の他に真空管自体が持っているモードも存在する、その周波数は、プレート電極とスクリーングリッド電極の径の比で決定される。

これらの不要なモードが観測された場合は、都度対策を打つのが現状である。本増幅器の場合は850 MHz近辺で発振現象が確認されたが、出力回路にダンピングの抵抗体を入れることで抑えることに成功した。

3 試験結果

IRCの現地調整試験(擬似負荷試験)は終了し、継続して客先での調整作業(共振器への給電とローレベル回路の定数調整)が行われた。共振器に高周波電力を供給する際、励振器からみた負荷抵抗が 50Ω になるように電力フィーダ(図2)を調整するが、電力供給開始の瞬間は先端が短絡状態に見えてしまう。それにより電力供給ライン(同軸管)が共振器となり、増幅器からみたインピーダンスが 50Ω ではなく極端に大きく見えてしまう場合がある。この状態では、増幅器に過大な電圧が発生し機器を破損してしまうことになる。IRCのシステムでは、電力供給ラインの長さを変えることで最適な状態に調整できる機構を準備した。これまでの試験で、増幅器の動作パラメータ、共振器の必要電圧発生およびローレベル回路の動作確認など基本事項に問題ないことが確認され、現在はFRCの調整、SRCの据付けを行っている。

IRCの現地調整はFRCの据付けと並行して行われたが、現地スタッフの協力により作業は段取り良く順調に推移した。IRC、FRCともに基本動作に問題のないことが確認され、2006年8月からはSRC/RF系の据付け・調整が開始された。

4 むすび

理研では3台の大型サイクロトロンの建設が行われ、当社は2台のサイクロトロン(IRC、FRC)の建設と残り1台(SRC)の高周波システム部分を担当した。

2台のサイクロトロンの基本性能確認は終了し、当初予定した性能が確認できた。

2006年8月からはSRC/RF系の据付けを開始した。10月までに基本性能の確認を行う予定で作業を進めている。

(参考文献)

- 矢野安重. 理研「RIビームファクトリー」計画. 加速器, vol.2, p.170 ~ 175, 2006.
- N.Sakamoto. 16th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications. Michigan, 2001, p.306-308, 2001.
- T. Fujisawa. Proc. 11th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications. Tokyo, p.329-332, 1986.
- L. Ederszegi. A model for the parasitic oscillations in power tetrodes. ELECTRONICS, p.575-582, 1986.

カセット方式FDG合成装置(F200)の開発

Development of Cassette Type FDG Synthesizer(F200)

田中 栄士*
Eiji TANAKA



図1 FDG合成装置(F200)
FDG Synthesizer(F200)

FDGによるPET検診は、近年、一般病院でも広く普及するようになってきた。

当社は、これまで約80施設にPET薬剤製造システムを納入しており、安定した性能が得られることで顧客から好評を得ている。カセット方式FDG (2-[¹⁸F] Fluoro-2-deoxy-D-Glucose) 合成装置(F200)は、そのような一般病院でも受け入れ易く、簡便な操作、短い合成時間および安定した性能を目標として、開発を進めてきたものである。

本装置の基本仕様および特長は、FDG合成収率が60±5%(EOS)、放射化学的純度が95%以上、FDG合成時間が30分以内、合成前準備時間が15分以内、アルカリ加水分解方式、反応器内の圧力制御により安定収率、カセット交換方式のため準備が簡単、分離型精製ラムシールドにより、2回合成時のオペータへの被曝量を低減および小型・軽量の9点である。

本報では、この新型FDG合成装置について紹介し、実際の納入後の性能について報告する。

In late years, the PET examination by FDG begins to spread widely even into general hospitals. We have delivered PET medicine production systems, to more than 80 facilities and get a favorable reputation from customers, because of their stable performance. We have worked on the development of the cassette type FDG synthesizer (F200) as a system that can be accepted even at those ordinary hospitals and provides stable performance with simple operation and short synthesis time. The basic specifications and features of this synthesizer are: (1) FDG synthesis yield 60 ± 5% (EOS), (2) radiochemical purity 95% or higher, (3) FDG synthesis time within 30 minutes, (4) synthesis preparation time within 15 minutes, (5) alkali hydrolysis, (6) a stable yield through pressure control in the reactor, (7) simple preparation based on cassette exchange, (8) reduced operator exposure in two rounds of synthesis through a separation-type refining column shield, and (9) a compact and lightweight design. This report introduces this new FDG synthesizer and describes its actual performance after the delivery.

1 まえがき

PET (Positron Emission Tomography) 検診は、2002年4月に保険適用になったことを契機に一般病院でも広く普及している。

FDG合成装置は、がん細胞の発見を目的としたPET検査に使用する放射性薬剤 ([¹⁸F] FDG 2-[¹⁸F] Fluoro-2-deoxy-D-Glucose) を製造する装置であるが、当社には、既に国産1号として医療機器認可を受けたFDG合成装置

(F100)(医療機器承認番号 21400BZZ00094000)があり、安定した性能を持つことから多数の納入実績がある。しかし、合成の準備が煩雑であり、その操作にある程度の技能の習得を必要とすることから、近年では簡便に扱え、合成時間も短く、性能の安定したカセット方式合成装置を望む顧客が増えてきている。カセット方式の新型FDG合成装置(F200)は、この状況に対処するべく開発を進め、2005年8月に医療機器として製造認可を受けたものである(図1)。(医療機器承認番号 21700BZZ00273000)

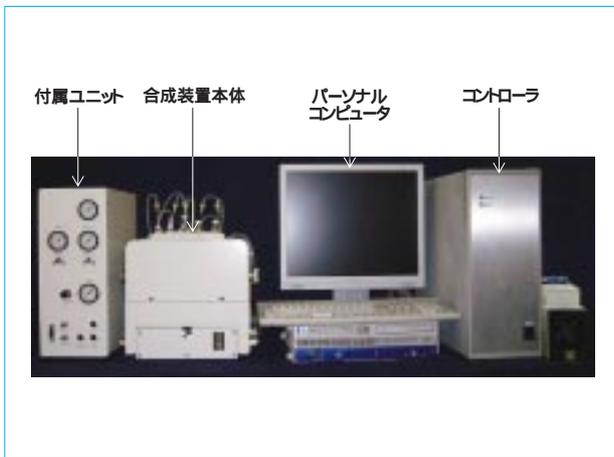


図2 装置の構成
Composition of devices

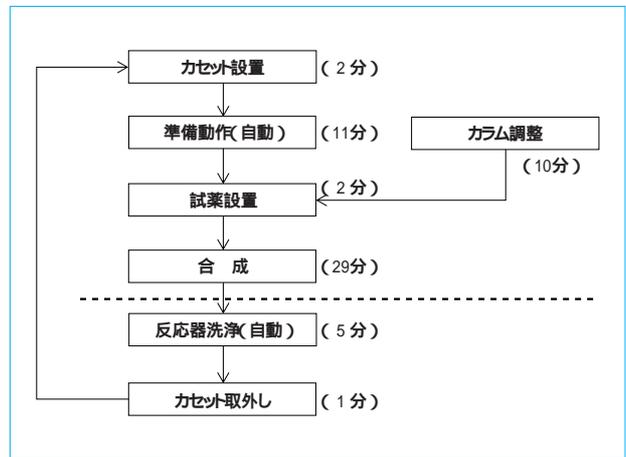


図4 合成作業フロー
Synthesis work flow

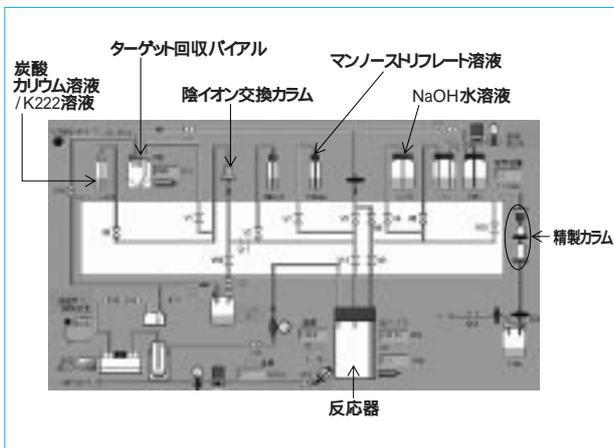


図3 合成装置フロー
Synthesizer system flow



図5 合成前チェックリスト画面
Check list display before synthesis

2 装置の概要

2.1 装置の基本仕様と構成

基本仕様を次に示す。

FDG合成収率	60 ± 5 %
	(EOS End Of Synthesis)
	(アルカリ加水分解方式)

放射化学的純度 95 %以上

FDG合成時間 30 分以内

合成前準備時間 15 分以内

装置の構成を、図2に示す。

装置の構成は、合成装置本体、本体に窒素ガスとエアを供給する付属ユニット、これらを制御するコントローラおよびパーソナルコンピュータからなる。装置本体は、非常にコンパクトになっており(300(W) × 270(D) × 280(H) mm)、また、F100と比較して、部品点数を削減することでより信頼性を向上させている。

2.2 FDG合成の原理と手順

[¹⁸F]FDG薬剤の合成は、ドイツのユーリッヒ研究所のHamacherらの方法に準拠している。当社は、FDG合成装置(F100)を開発するにあたり、ユーリッヒ研究所と技術

提携契約を締結し技術導入を行った。その合成概要を次に示す(図3)。

サイクロトロンで製造された¹⁸Fフッ化物イオンを含む溶液を陰イオン交換カラムに固相吸着し、¹⁸O水と分離した後炭酸カリウム溶液にて溶出し反応器に送る。これと、クリプトフィックス222(K222)のアセトニトリル溶液を混合し、反応器内で陰圧条件下の加熱により水およびアセトニトリルを完全に蒸発させる。次に、原料であるマンノースリフレートのアセトニトリル溶液を加え加熱し、¹⁸Fフッ化物イオンと反応させ、フッ素化を行う。その後、0.3 mol/mLの希水酸化ナトリウム(NaOH)水溶液で加水分解を行い、精製カラムを通過させて [¹⁸F]FDG薬剤を得る。

実際のF200の合成手順としては、以下のように進行する。合成の準備から合成、2回目の合成までのフローを、図4に示す。

合成装置用のPCを立ち上げ、画面に表示される合成装置および周辺機器の状態を確認するチェックリスト(図5)に従って装置の状態を確認し、カセットを装置本体に設置する。全ての項目にチェックマークを入れ、次の合成準備画面に進む。

合成準備画面の準備開始ボタンを押して、装置の健全

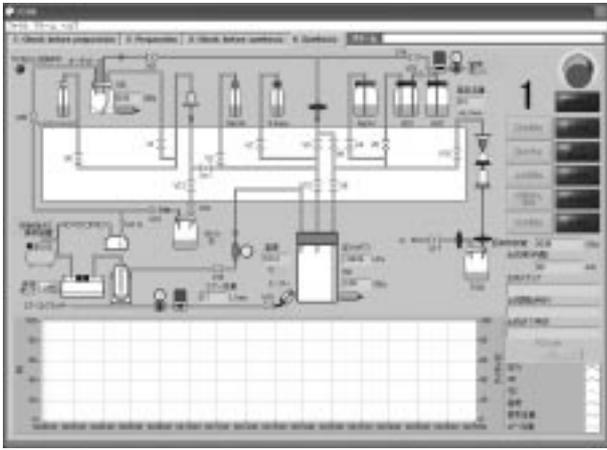


図6 合成画面
Synthesis display

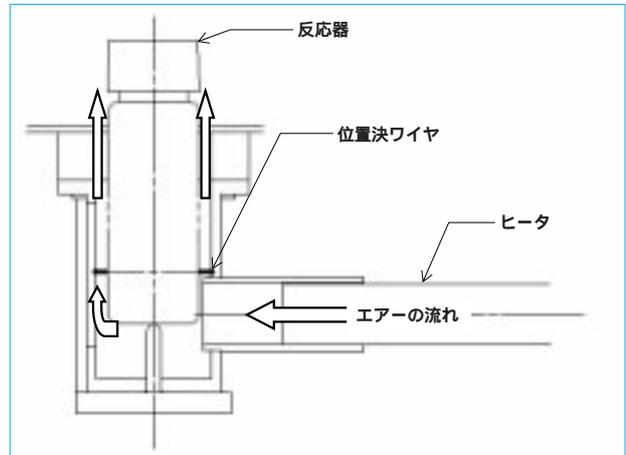


図8 ヒータ部の構造
Composition of heater part



図7 カセット
Cassette

性を確認するテストが開始される。各テスト項目が自動的に行われ、11分で完了する。この間に、精製カラムおよび試薬の準備を行う。

準備動作が完了すると合成前のチェックリスト画面に切り替わり、ここで試薬・精製カラムの設置状態を確認する。全項目にチェックマークを入れると、合成画面(図6)に切り替わる。

ここまでは、合成前準備であり、カセットの設置に始まり試薬の設置までが15分で完了する。

合成画面の合成開始ボタンを押すと、自動的に合成の各ステップが実施される。合成は、¹⁸Fフッ化物イオンの吸着から始まり精製まで29分で完了する

2回目の合成を行う場合は、カセット・反応器の洗浄を行い、使用済みのカセットを取り外し次合成の準備を行う。

3 装置の特長

3.1 カセットと試薬キット

本装置には、合成ごとに使い捨てするカセット(図7)と、試薬キットを採用しており、簡便に合成の準備をすることができる。

装置内の全接液部は全てカセット内に納められ、バルブはエア駆動のピンチバルブ方式を採用していることから、汚れの蓄積・部品の劣化などが発生せず、安定した性能が達成できている。さらに、カセットはターゲット回収バイアル・反応器・試薬ラインチューブを一体にしており、継手を極力少なくすることにより、リークの低減と合成準備の煩雑性を軽減している。カセットと本体および試薬との接続部には、本体メーカーおよび試薬バイアル色に合わせた色マーカを配置し、接続間違いを防止している。

合成に使用する試薬は、薬品メーカーと共同開発し、F200専用キットとして、薬品メーカーより販売されている。これを使用することにより、調合などの煩雑な作業をする必要がなくなり、簡便に準備することができる。

3.2 ヒータ周りの構造とエア-流量

2.2にて説明したように、合成では反応器を過熱する必要があり、本装置ではエア-ヒータを採用している。装置のヒータ周りを、図8に示す。

反応器は下から1点で支えられ、横からは極細のワイヤ-により3点で位置決めされている。極力他の部品との接触面積を小さくし、反応器から外部への熱の流出を防ぐよう考慮している。さらに、反応器全体を熱風が覆うように、ヒータエア-の流れを設計することで、反応器全体の温度が均一になるように工夫している。ヒータエア-流量は、反応器温度へ与える影響が大きい重要な要素である。そこで、エア-流量の調整に採用しているマスフローコントローラ(精度 ±1NL/min)で十分な制御が可能か、検証を行った。

試験条件は下記のとおりで、エア-流量を規定値に対して±5NL/min変化させ、そのときの反応器内液温を測定、比較した。

反応器内液	アセトニトリル	1.3 mL
ヒータエア-流量	50, 55 (規定値), 60 NL/min	
ヒータ設定温度	測定開始から180秒の間	90
	180~450秒の間	110

その結果、反応器内液温の差は最大でも±1.3であり、合成に大きな影響を与えるようなものではなかった(図9)したがって、採用したマスフローコントローラで十分な制御が可能であると判断した。

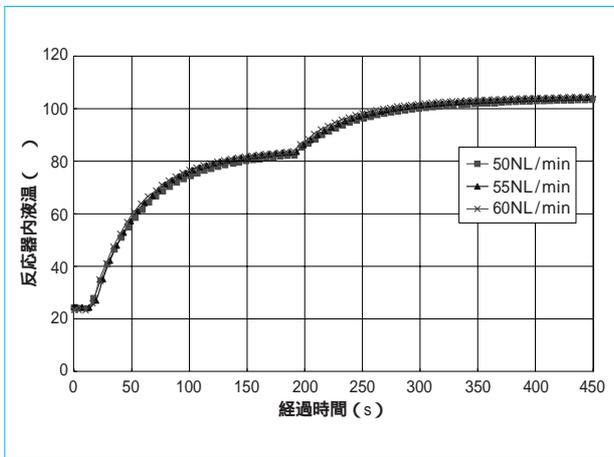


図9 反応器液温測定結果
Result of liquid thermometry in reactor

3.3 カラムシールドと洗浄機能

合成後のカセット、反応器および精製カラムなどには、放射性物質がある程度残留する。社内での合成テストにおいて、それらへの放射性物質の残留率（合成装置に導入される¹⁸Fフッ化物イオンの放射線量に対する割合）平均値を次に示す。

ターゲット回収バイアル	1 %
反応器	7 %
チューブ	0.4 %
精製カラム	15.3 %
陰イオン交換カラム	1.1 %

本装置では、2回合成する場合を考慮して、オペレータへの被曝を低減させている。2個の精製カラムを収納できる30 mm厚の鉛製シールドを設け、最も放射線残留量の高い精製カラムをシールドしている。

また、本装置は、自動洗浄機能を有しており、精製カラムの次に残留率の高い反応器およびチューブの放射性物質をホットセルを開けることなく、除去することができる。前述の精製カラムシールドとともに、この機能を使用することで、1台の装置で1日2回の合成をする場合の合成準備中の被曝量をさらに低減させている。

3.4 反応器圧力の監視機能

FDGの合成において、反応器内圧力は重要な監視項目の一つである。本装置では、合成中の以下の反応器内圧力を監視している。

Dry up 1	最終圧力
フッ素化	初期圧力, 最終圧力
Dry up 2	最終圧力
加水分解	初期圧力, 最終圧力

、のDry upの監視は各ステップの最終圧力を監視することで反応器内の乾燥状態に問題がないか判定し、、のフッ素化および加水分解の各圧力は反応器内の温度が正常に上昇しているか判定する。特に、については、圧力がしきい値に達することを判定し、次ステップへ進むようプログラムされている。

4 装置の性能

本装置は、2005年9月に最初の施設に納めてから2006年7

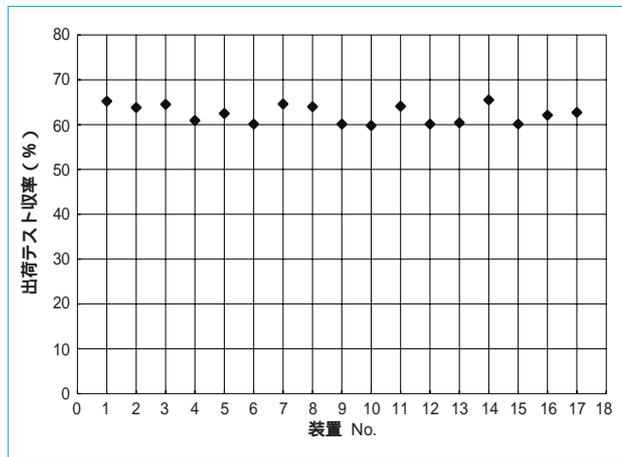


図10 全出荷テスト合成収率
Yield of all shipment test

月末現在までに、合計10施設・17台を納めており、順調に稼働している。

2006年7月末までの全装置の出荷テスト合成収率の統計は、平均収率62.4%、標準偏差2.07%と開発仕様を満たす非常に安定した性能を発揮している（図10）。

また、放射化学純度についても、平均98.05%、標準偏差1.0%と非常に良好な結果となっている。臨床停止につながる重故障は、1件も発生していない。

5 むすび

本報では、カセット方式の新型FDG合成装置（F200）の開発について報告した。

その装置の性能は、

FDG合成収率	62.4 ± 2.07 % (EOS)
放射化学的純度	98.05 ± 1.0 %
FDG合成時間	29分
合成前準備時間	15分

であった。

これは基本仕様を満足しており、非常に良好な性能を実現している。

（参考文献）

F. Fuchtnr. Basic Hydrolysis of 2-[¹⁸F]Fluoro-1, 3, 4, 6-tetra-O-acetyl-D-glucose in the Preparation of 2-[¹⁸F]Fluoro-2-deoxy-D-glucose. Appl. Radiat. Isot., vol.47, no.1, p.61-66, 1996.

K. Hamacher. Computer-aided Synthesis of No-carrier-added 2-[¹⁸F]Fluoro-2-deoxy-D-glucose: an Efficient automated System for the aminopolyether-supported Nucleophilic Fluorination. Appl. Radiat. Isot., vol. 41, no.1, p.49-55, 1990.

[¹¹C]メチオニン合成装置の開発

Development of Miniature Module for [¹¹C]Methionine Synthesis

渡辺利光* 新屋洋* 上野悟史*
Toshimitsu WATANABE Hiroshi ARAYA Satoshi UENO



メチオニン合成モジュール
Methionine synthesis module

[¹⁸F]FDG (2-[¹⁸F]Fluoro-2-deoxy-D-glucose) を用いたPET (Positron Emission Tomography) 検査は、がん診断の分野で急速に広まってきている。一方、標識アミノ酸である [¹¹C]メチオニンが [¹⁸F]FDGによるがん診断を補う薬剤として臨床への応用が広がっている。しかし、[¹¹C]メチオニンは [¹¹C]標識であることから、短半減期であり臨床でこれを用いて多数の検査を実施するには一日複数回合成しなければならない。従来の [¹¹C]メチオニン合成装置はこれにこたえることができなかったため、この要求を満足するような [¹¹C]メチオニンを合成する自動合成装置を開発した。

開発ポイントとしては、作業従事者の被曝低減に、ホットセル内に複数台設置できるように [¹¹C]メチオニン合成装置を小型化し、さらに比較的短時間での効率の良い合成に、従来の溶媒除去操作を省いたプロセスを用いたことである。

[¹⁸F]FDG-PET has spread rapidly in the cancer diagnosis. On the other hand, [¹¹C]Methionine is paid attention as one of the PET drugs that may help cancer diagnosis by [¹⁸F]FDG. Due to its short half-life, repeated preparations of [¹¹C]Methionine, two or three times a day, are generally required for the routine PET practice. Although the automatic synthesis devices for [¹¹C]Methionine were developed, it was difficult to supply [¹¹C]Methionine two times a day or more. We developed a methionine synthesis system that was able to supply [¹¹C]Methionine two times a day or more, and a new methionine synthesis unit. The new synthesis unit is able to synthesize [¹¹C]Methionine efficiently without HPLC preparation and evaporation in a short time. The new methionine synthesis unit and system are more useful for the routine synthesis of [¹¹C]Methionine.

1 まえがき

PET (Positron Emission Tomography) 検査は核医学診断手法の一つであり、種々の放射性薬剤を用いることにより、血流・代謝といった生理学的な情報を得られるという特長を有している。2002年4月に [¹⁸F]FDG (2-[¹⁸F]Fluoro-2-deoxy-D-Glucose) を用いたがん診断が保険適用になったこと、および関連装置の小型化・自動化が進み、従来と比べて省スペース・少数人員での運営が可能になったことにより、

一般病院へのPET検査が急速に普及してきている。現在では、国内において150施設以上で [¹⁸F]FDGを用いたPET検査が実施されている。近年、[¹⁸F]FDGによるがん診断を補う薬剤の要求が高まりつつあり、中でもアミノ酸取込みの計測を行う [¹¹C]メチオニン有用性が高く評価されてきている。当社ではこのような要求にこたえて、新規に [¹¹C]メチオニン合成装置開発を行った。本報では、開発した [¹¹C]メチオニン合成装置および試験結果について報告する。

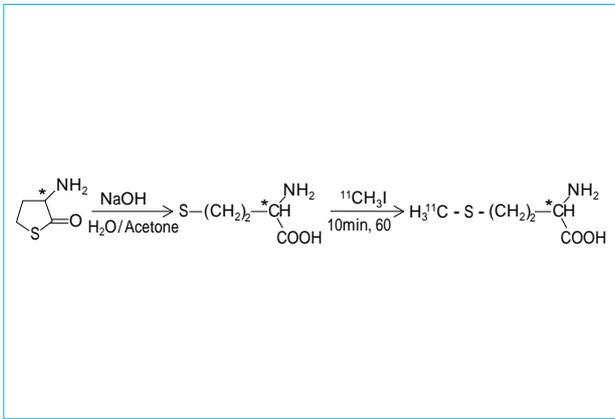


図1 [¹¹C]メチオニンの合成スキーム
Scheme of [¹¹C]methionine synthesis from [¹¹C]CH₃I

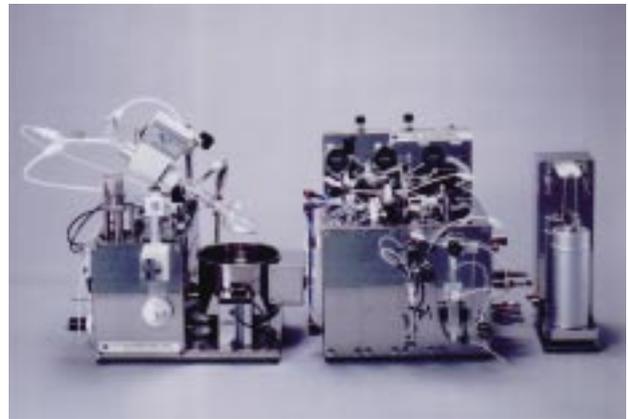


図2 従来のメチオニン合成装置
Current [¹¹C]methionine synthesis device

2 開発の背景

2.1 [¹⁸F]FDG-PET検査と [¹¹C]メチオニン

[¹⁸F]FDGを用いたPET検査はがん診断の分野でその有用性が高く評価されているものの、脳・心臓などの正常組織および炎症部位においては生理的に集積してしまう。それにより、これら組織および周辺領域においてはがんの診断が困難になると言われている。このような [¹⁸F]FDGを用いたPET検査の弱点を補う研究が進められており、中でも標識アミノ酸の [¹¹C]メチオニンは、正常な脳組織および炎症部位への取込みが比較的少なく、細胞増殖の盛んながん細胞に取り込まれることから、[¹⁸F]FDGが苦手とする脳腫瘍診断および放射線治療に対する効果判定の分野においてその有用性が報告されている。さらに、[¹¹C]メチオニンの半減期(20分)は [¹⁸F]FDGの半減期(110分)と比較して短く放射能の減衰が早いことから、[¹¹C]メチオニンを臨床で使用する場合、合成方法、使用方法ともにより時間的な制限が厳しくなる。例えば、[¹⁸F]FDGでは、午前中に一回または午前、午後一回ずつ合成すれば十分に臨床に必要な薬剤を供給できる。一方 [¹¹C]メチオニンではその半減期の短さから、通常は1合成あたり1~2人程度に制限されてしまう。そこで、[¹¹C]メチオニンを用いて [¹⁸F]FDGと同等に10人/日程度の検査数を行うには1~2時間ごとに薬剤を供給できる合成装置が必要となってくる。

2.2 従来の [¹¹C]メチオニン合成プロセスとその問題点

通常 [¹¹C]メチオニンの合成は、サイクロトロンによる [¹¹C]CO₂の製造 [¹¹C]ヨウ化メチル (CH₃I) などの標識前駆体の合成 薬剤の標識反応 精製および製剤化、という流れで行われる。これまでに [¹¹C]標識前駆体としては数多く開発されているが、中でも [¹¹C]CH₃Iは、窒素・酸素・硫黄にメチル基を導入する [¹¹C]メチル化標識薬剤として、最も一般的に使用されている。その合成方法としては、[¹¹C]CO₂をLiAlH₄/THFで [¹¹C]CH₃OHに還元後、HIとの反応で [¹¹C]CH₃Iとする液相法による合成が従来から用いられてきた。しかし、本法は合成ごとに反応器および試薬を準備する必要があり、上述したように連続的に合成を行うには適していなかった。液相法が開発された後に、[¹¹C]CO₂を [¹¹C]CH₄に変換後、[¹¹C]CH₄とI₂蒸気を高温のカラム中で反応さ

せる気相合成法が新たに報告された。この気相合成法は全工程を気体状態で行うことができることから、合成ごとに反応器や試薬を準備することなく繰り返しての合成が可能であり、[¹¹C]CH₃Iを比較的短時間に繰り返して製造するのに適している。メチオニン合成装置の開発ではこの気相法 [¹¹C]CH₃I合成装置により繰り返し、[¹¹C]CH₃Iを供給できるようにした。

次に、[¹¹C]CH₃Iと薬剤の前駆体とを反応させる方法についてであるが、[¹¹C]メチオニンを合成する方法としては種々の合成法が報告されている。中でも前駆体を溶解した溶媒に [¹¹C]CH₃Iを捕集し、加熱反応させることにより、[¹¹C]メチオニンを合成する方法が古くから使用されているが(図1)、本合成法ではアセトン溶媒中でメチル化反応させることから、注射用薬剤にするには一度反応液を濃縮乾固し、アセトンを除去する必要がある。この場合、合成ごとに反応器および濃縮装置を準備しなければならず、被曝などの観点から [¹¹C]メチオニンを短時間に繰り返して供給することは困難であった(図2)。その後、ルーチンで [¹¹C]メチオニンを合成することを考慮した、固相標識法またはオンカラム法と呼ばれる標識合成方法が開発された。本法は、原料基質を溶解した溶媒を固相へ吸着させ、そこへ気体状の [¹¹C]CH₃Iなどのメチル化試薬を導入することで反応を進行させる方法である。本法は、標識反応・精製などをカラム上で流れ作業的に行うことができることから、合成装置の自動化が容易であると同時に使い捨てのカラムを使用することで装置の準備・後処置がより簡便になるという特長を有している。また、オンカラム法による合成は装置がより単純化できることから、装置の小型化が期待できる。これまでに、Pascaliらによりオンカラム合成法を用いた [¹¹C]メチオニン合成法が報告されている。しかし、本法では [¹¹C]CH₃Iのカラムへの捕集効率向上にエタノールを用いており、その溶媒留去工程を行う必要があった。Någrenらは、より強力なメチル化剤である [¹¹C]メチルトリフレート ([¹¹C]CH₃OTf)を用いて水系溶媒中で高効率に [¹¹C]メチオニンを得る方法を報告している。本開発ではこれら報告されている方法を改良し、溶媒留去工程の必要のないより簡便なメチオニン合成法の開発を行い、メチオニン合成装置の小型化を行った。

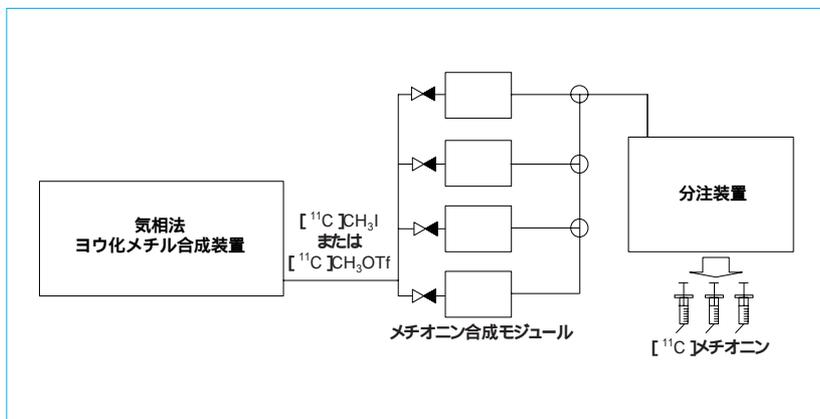


図3 [¹¹C]メチオニン合成システム
[¹¹C]methionine synthesis system

表1 メチオニン合成モジュールを用いた試験結果
Results of [¹¹C]methionine synthesis by methionine synthesis module

放射化学的収率 (EOS)	81 %
合成時間	3 ~ 4 min
残留放射能分布	
製品バイアル	92 %
tC18カラム	< 1 %
QMAカラム	< 1 %
CMカラム	< 1 %
Charcoalカラム	6 %

3 開発内容

3.1 開発要件

本開発では、前述したように [¹¹C]メチオニンを用いて [¹⁸F]FDGと同等数の検査がこなせることを目標として、下記条件を満足するよう考慮して開発を行った。

[¹⁸F]FDGと同等数の検査が行えるよう、短時間で連続して [¹¹C]メチオニンが供給できること。

合成された [¹¹C]メチオニンの品質が、サイクロトロン核医学利用専門委員会が成熟技術として認定した「放射性薬剤の基準と臨床使用の指針（1999年改定）」の基準を満たすこと。

合成装置が医療機器の基準を満たしていること。

作業者の被曝低減を考慮した合成装置とすること。

装置の準備、メンテナンスなどが容易であること。

3.2 全体構成

図3に、メチオニン合成システムの構想図を示す。本システムでは、前述したとおり気相法ヨウ化メチル合成装置により繰り返して [¹¹C]CH₃Iまたは [¹¹C]CH₃OTfを合成し、ホットセル内に複数台設置した小型のメチオニン合成装置に順次供給し、連続的に [¹¹C]メチオニン合成できるようにした。次に合成された [¹¹C]メチオニンは、洗浄機能を有したシリンジ分注装置に移送され、常にクリーンな薬剤が供給できるように計画した。

3.3 メチオニン合成装置の開発

3.3.1 合成プロセス

今回の開発では、ルーチンで複数回 [¹¹C]メチオニンを合成するシステムとすべく、1回の合成をより短時間で簡便に行えるように新規に合成プロセスの開発を行った。

下記に、新規に開発したより簡便な [¹¹C]メチオニン合成

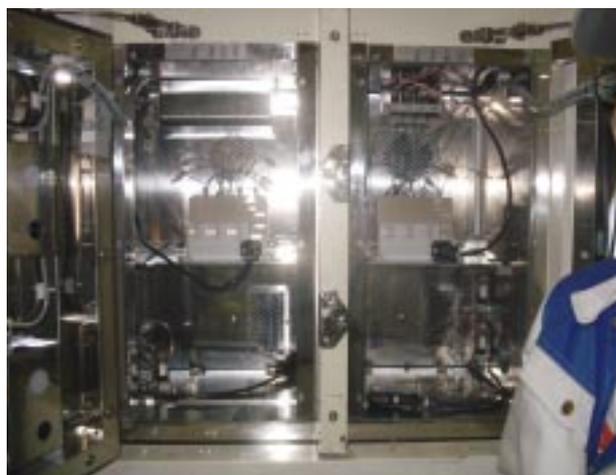


図4 メチオニン合成モジュール格納ホットセル
Hot cell for methionine synthesis module

法を示す。今回の方法では、Nägrenらの報告を参考にして標識試薬に [¹¹C]CH₃Iの代わりに [¹¹C]CH₃OTfを用いることにより、カラムに充填した水系原料溶媒への捕集効率を上げるようにした。また、原料充填用カラム、中和精製用カラムは、すべて市販のものを用いることにより準備・後処理の簡便化を図った。合成プロセスについて下記に示す。

前述したように、気相法または液相法により [¹¹C]CH₃OTfを合成する。

[¹¹C]CH₃OTfをHe気流下、前もって原料を充填した Sep-pak tC18カラムに移送し、捕集・反応させる。

揮発性不純物を除くべく、Heにてラインおよびカラムをパージする。

生理食塩水にて反応物を溶出し、中和用カラムに通して製品バイアルに回収する。

インプットした [¹¹C]CH₃OTf量に対する [¹¹C]メチオニンの合成効率は80%以上（時間補正なし）であった。今回開発した方法では有機溶媒を使用していないことから、その留去工程を省くことができ、合成時間の短縮が可能になった。[¹¹C]CH₃OTf導入開始から合成収量までの合成時間は5分以内であり、濃縮乾固の必要な従来の液相法と比較して、3分程度の時間が短縮された。表1に、合成実験結果を示す。

3.3.2 メチオニン合成装置の小型化

本開発では [¹¹C]メチオニンの繰返し供給に対応すべく、メチオニン合成装置を小型化し、一つのホットセル内に複数

表2 [¹¹C]メチオニンの品質検定結果
Quality authorization results of [¹¹C]methionine

	FDGの基準値	結果
バッチあたりの容量	-	3.6 ± 0.2 mL
放射エネルギー	-	3.540 ± 0.1 MBq
性状	澄明	澄明
粒子の有無	認めない	認めない
pH	5 ~ 7.5	7 ~ 8
放射化学的純度	> 95 %	97.6 ± 1.8 %
エンドトキシン試験	< 0.25 EU/mL	< 0.25 EU/mL
無菌試験	菌の発育を認めない	菌の発育を認めない
残留溶媒試験 エタノール	< 2000 ppm	152 ± 48 ppm

台設置し、順次合成に使用することにより繰り返しての供給に対応するようにした。

メチオニン合成装置は、1 mm程度の流路を加工したPEEK製マニホールドブロックと小型電磁弁で作成し、小型化を行った。(特許出願中)全体の寸法は200(W)×120(D)×200(H) mmで、ホットセル内に複数台設置できる大きさとなった。冒頭の図に開発したメチオニン合成装置を、図4にメチオニン合成装置収納ホットセル示す。

3.3.3 性能および薬剤の品質検定結果

得られた性能および薬剤の品質検定結果を、表2にまとめる。品質検定項目は、サイクロترون核医学利用専門委員会が成熟技術として認定した「放射性薬剤の基準と臨床使用の指針(1999年改定)」に記載されている検定項目を参考にした。放射化学的純度は95%以上であり、その他生物学的安全性試験にも合格した。残留溶媒試験にてユニットの洗浄に使用するエタノールが確認されたが、[¹⁸F]FDGの許容値と比較しても十分に低い値であった。以上により、臨床に使用できる品質の[¹¹C]メチオニンが合成できた。

4 むすび

[¹¹C]メチオニン合成装置の小型化により、一つのホットセル内に4台合成装置を設置できるようになり、[¹¹C]メチオニンの繰り返し供給に対応可能になった。

合成した[¹¹C]メチオニンは放射性薬剤の品質基準を満たしており、ルーチン検査への使用に十分対応できるものであると考えられた。

本装置の開発において、国立大学法人東北大学サイクロترون・ラジオアイソトープセンターの岩田錬教授および東京都老人総合研究所ポジトロン医学研究施設の石渡喜一研究部副部長の多大なる指導および協力に深く感謝の意を表す。

(参考文献)

伊藤正敏, 遠藤啓吾, 越智宏暢, 福田寛, 米倉義晴, 寺田弘司. 臨床医のためのクリニカルPET. 2001.

Joanne Nuutinen, Sirkku Jyrkkio, Pertti Lehtikoinen, Paula Lindholm and Heikki Minn. Evaluation of early response to radiotherapy in head and neck cancer measured with [¹¹C] methionine-positron emission tomography. Radiotherapy and Oncology 52, p.225-232, 1999.

Peter Larsen, Johan Ulin, Kent Dahlstrom and Mikael Jensen. Synthesis of [¹¹C]iodomethane by iodination of [¹¹C]Methane. Appl. Radiat. Isot. 48, p.153-157, 1997.

Claudio Pascali, Anna Bogni, Ren Iwata, Donatella Decise, Flavio

Crippa and Emilio Bombardieri. High efficiency preparation of L-[S-methyl-¹¹C]methionine by on-column [¹¹C]methylation on C18 Sep-Pak. Journal of Labeled Compounds and Radiopharmaceuticals, 42(8), p.715-724, 1999.

岩田錬. PET薬剤のオンカラム合成. RADIOISOTOPES, no.47, p.379, 1998.

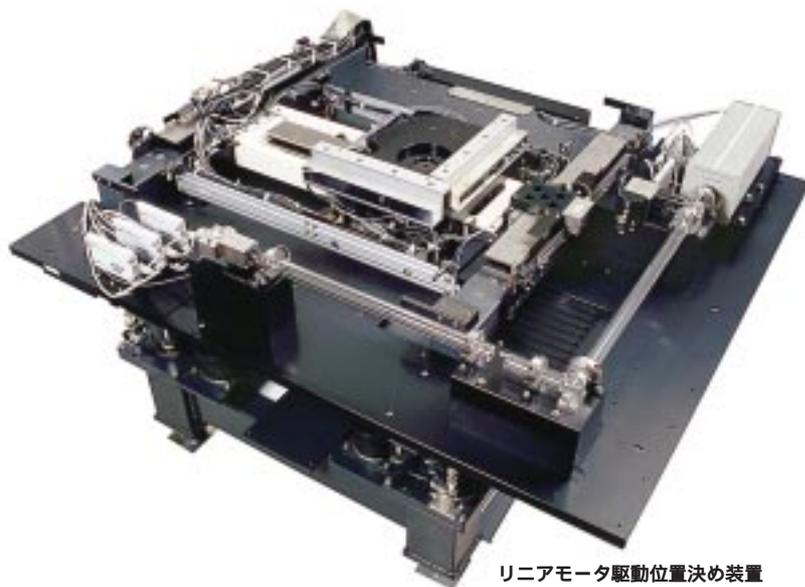
Kjell Nägren and Christer Halldin. Methylation of Amide and Thiol Functions with [¹¹C]Methyl Triflate, as Exemplified by [¹¹C]NMSP, [¹¹C]Flumazenil and [¹¹C]Methionine. J. Labeled Cpd. Radiopharm., no.41, p.831-841, 1998.

RADIOISOTOPES, no.48(12), p.65-90, 1999.

リニアモータとボールネジの駆動特性評価

Evaluation of Drive Performance of Linear Motor and Ball-screw

富田 良幸*
Yoshiyuki TOMITA



リニアモータ駆動位置決め装置
Positioning system driven by linear motor

半導体および液晶製造装置などの電子部品精密加工装置の分野では、精密駆動機構は装置の全体性能を決める上で重要なキーコンポーネントとなっている。従来、精密駆動機構の多くは、サーボモータによりボールネジを駆動する方式のものが主流であったが、近年、特に半導体や液晶製造装置の精密駆動機構に対する要求仕様が高まるに従い、リニアモータを用いる事例が増えてきている。本報ではボールネジ駆動方式とリニアモータ駆動方式に着目し、特に電子部品製造装置用の精密駆動機構の視点から両駆動方式の比較評価を行った。

ここでは、近年増えてきているスキャン動作に注目し、その安定性および追従精度の特性に関する比較および評価について述べる。

Precise motion and positioning system is a very important component in manufacturing equipments for semiconductor and flat panel display devices. Most of conventional manufacturing equipments have used servomotor and ball-screw drive method to obtain positioning accuracy and stability. Recently, as requirement for higher performance including positioning and scanning motion capabilities increases in particular semiconductor and flat panel display applications, the use of new drive methods with linear motor has been increased. This paper describes evaluated results of characteristics of servomotor/ball-screw drive method and linear motor drive method, in particular, regarding the performance including accuracy and stability of scanning motion under constant velocity command.

1 まえがき

近年、半導体および液晶製造装置などの電子部品加工装置の分野では、精密駆動機構は装置の全体性能を決める上で最も重要なキーコンポーネントとなっている。従来、精密駆動機構の多くは、サーボモータによりボールネジを駆動する方式のものが主流であった。しかし、近年特に半導体や液晶製造装置の精密駆動機構に対する要求仕様が高まるに従い、リニアモータを用いる事例が増えてきている。当社においても、1999年より特にリニアモータ駆動方式を中心とした精密駆動機構を市場に投入してきている。

本報では、当社での製品群を例として、特に電子部品製造

装置分野におけるボールネジ駆動方式とリニアモータ駆動方式の特徴、使い分け、性能比較および評価について述べる。なお、ボールネジとリニアモータの駆動特性、特に精密駆動時の特性に関しては既に多くの報告がなされていることから、本報では、当社製品のこれまでの実績データ¹⁾をもとに、最近特に増えているスキャン動作時の駆動性能に注目し、その比較評価結果を中心に述べる。

2 精密駆動機構の用途と駆動方式

精密駆動機構は、主にXY平面内での運動を行う駆動軸と、製造装置それぞれの目的にあった補助軸に大きく分けられる。図1に、精密駆動機構の代表的な軸構成を示す。駆動軸

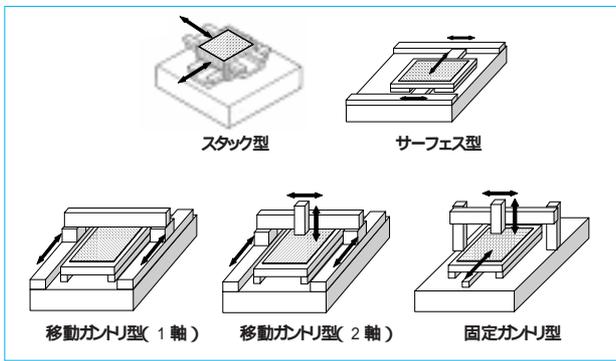


図1 各種位置決め装置の軸構成
Axis configuration of positioning systems

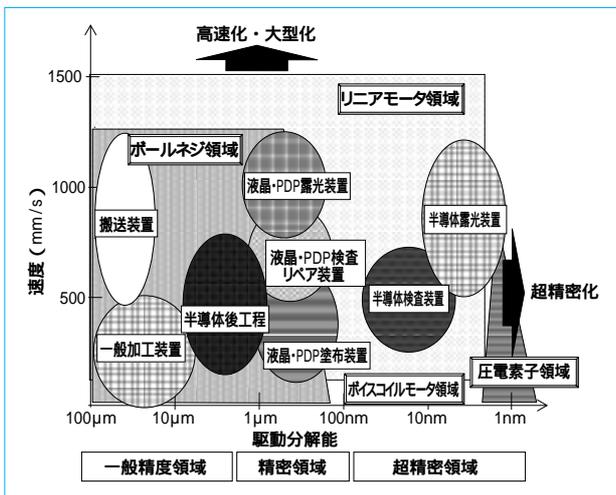


図2 駆動分解能、最高速度および駆動方式
Map of positioning resolution, maximum velocity and drive methods

の構成は、個別の駆動軸を2段に重ね合わせた従来型のスタック型、駆動部とガイド部をH型に構成したサーフェス型、さらにガントリ型に分けられる。このガントリ型は、固定ガントリで駆動軸を有するタイプと、ガントリ自体が移動する移動ガントリ型に分けられる。サーフェス型では、多くはリニアモータを駆動系として用い、ガイドをエアベアリングとしている事例が多いが、スタック型およびガントリ型については、ボールネジとサーボモータによる駆動系、転がりガイドを用いた例も多い。これら以外にも、特にストロークが小さい領域、あるいは高速な応答を必要とする分野では、弾性ガイド(フレクチュア)などとの組み合わせにより特殊な軸構成を用いるものもある。

図2は、リニアモータやボールネジ等の駆動方式をその分解能と速度により分類し、あわせてその利用分野を製造装置別に分類したものである。製造装置の目的にもよるが、一般的な傾向としては、分解能1μmから100nmがボールネジとリニアモータの境界領域となっている。数10nm領域では、多くの事例でリニアモータが使われる傾向があり、5nm以下の領域は圧電素子あるいはボイスコイル駆動方式を用いる事例が多い。一方、速度性能面では、最高速度0.5~1.5m/sの高速領域でリニアモータを使用する事例が増えている。なお、最近の新しい動向として、特に液晶やプラズマディスプレイに用いるガラスサイズの大型化傾向が著しく、スループ



図3 各種リニアモータ駆動位置決め装置
Precise positioning systems driven by linear motors

表1 駆動系構成と適用分野
Drive methods and application fields

位置決め装置の構成・駆動方式	用途	半導体分野			液晶・PDP分野	
		露光装置	検査装置	その他後工程	露光装置	検査・リベア装置 コータ他
XY駆動軸構成	XY H型	リニアモータ・エアベアリングガイド	スキャン・位置決め	スキャン・位置決め	スキャン・位置決め	
	XYスタック	リニアモータ・転がりガイド		位置決め	位置決め	スキャン・位置決め
		ボールネジ・転がりガイド				位置決め
ガントリ駆動	リニアモータ・エアベアリングガイド				スキャン	スキャン
	リニアモータ・転がりガイド				位置決め	スキャン
上下・チルト軸	ボールネジ・転がりガイド	位置決め	位置決め		位置決め	位置決め
	ボイスコイル・エアベアリングガイド		位置決め			
	ピエゾアクチュエータ	位置決め	位置決め			

ット確保の高速化が進んでいる。図3に、リニアモータ駆動を用いた当社精密駆動機構の実例を示す。

次に、表1は、精密駆動機構の用途と軸構成、また、それぞれの構成における駆動方式をまとめたものである。表中、上下およびチルト機構(Z方向の並進動作とXY各軸周りの回転動作を行う場合が多い)については、用途と駆動方式のみを示す。各精密駆動機構および各駆動軸の駆動方式は、目的とする加工装置分野および動作方向などにより異なるが、大きく精密駆動を主目的とする場合とスキャン動作を行う場合に大別される。特に、XY方向の基本軸に関する最近の傾向では、電子部品や液晶部品の露光や塗布などでスキャン動作の速度安定性を重視することから、リニアモータとエアベアリングあるいは転がりガイドを用いる方式が増加する傾向が見られる。一方、上下軸やチルト軸の駆動方式は、ほとんどの場合ボールネジとサーボモータを用いる方式が用いられている。これは、液晶など可動部付加質量が数100kgから数tと大きくなる傾向があることによる。一方、事例は少ないが応答性や駆動精度を重視し、ボイスコイルモータとエアベアリングを用いる方式や圧電素子を用いた駆動系も使われている。当社の場合、ウエハの上下方向駆動系で500Hz程度の位

表2 ボールネジとリニアモータの一般特性比較
Comparison of characteristic differences between ball-screw/
servomotor drive system and linear motor drive system

	ボールネジ+サーボモータ	リニアモータ
ストローク	アクチュエータ性能に影響。	アクチュエータ性能はストロークの影響少ない。
最高速度	危険速度，ボール循環速度の制約により決まる。	基本的にはドライバ能力により決まる。
制御系構成	セミクロード，フルクロード両方式可能。	フルクロード
機械系	精度確保には高剛性が望ましいが，セミクロード系では設計上の余裕大。フルクロードでは，高剛性設計が必須。	制御系の安定性確保に，機械系の高い剛性確保が必須。
制御特性	セミクロード構成によりサーボ剛性は確保しやすい。セミクロード，フルクロードの併用により応答性と精度の両立が可能。	ダイレクトドライブであり，応答性，精度面で高い性能が可能。機械系剛性が重要。
制御精度	位置決め時の停止安定性，外乱に対する安定性が高い。スキャン精度にやや難あり。	エアベアリングとの組み合わせでは，停止安定性にやや難。スキャン精度は高い。
コスト	基本的に低コスト，転造ネジなどさらに低コスト・高品質化が進んでいる。	依然ボールネジに比べ高いが，低下傾向あり。

置応答性確保には，エアベアリングガイド系とボイスコイルモータを用いることで，これを実現している。

表2に，ボールネジ・サーボモータ駆動系とリニアモータ駆動系の一般的な比較結果を示す。ボールネジとリニアモータは，それぞれに長所と短所を持っており，一概にその優劣を述べることはできない。それぞれの長所を考慮し，用途により使い分けているのが実情である。

表1に示した精密駆動動作とスキャン動作の視点で見ると，一般的にはボールネジ方式は精密駆動動作に向いており，回転体の微振動などによりスキャン動作には不向きである。これに対してリニアモータは推力を直接可動負荷に伝えることができることから，どちらの用途にも適している。ただし，リニアモータの場合，特にエアベアリングガイドなどにより非接触ガイドされた系では，外乱に比較的弱く，停止精度や速度安定性が低い。ケーブルテンションの変動や定盤の揺れ，さらに永久磁石の磁束分布など，加速度外乱の影響を受けやすいという問題点がある。このことから機械系の剛性をかなり高く設計することが必要であり，さらに制御方式についても外乱に対して強い制御系の適用が必要である点は注意すべき点である。これに対してボールネジ駆動方式は，一般に摩擦力を介した駆動方式であるので，これらの外乱の影響を原理的に直接受けにくいという利点がある。

3 リニアモータとボールネジの駆動特性比較と評価

ボールネジとリニアモータの駆動特性，特に精密駆動時の特性に関しては，これまで多くの報告がなされている。そこでここでは，当社のこれまでの実績データをもとに，最近増えているスキャン動作時の性能に関する検討結果についての比較検討結果を述べる。

3.1 評価モデル

図4に，評価モデルの駆動系構成を示す。駆動系の構成は，以下の4形式を用いた。

ボールネジ駆動 + 転がりガイド

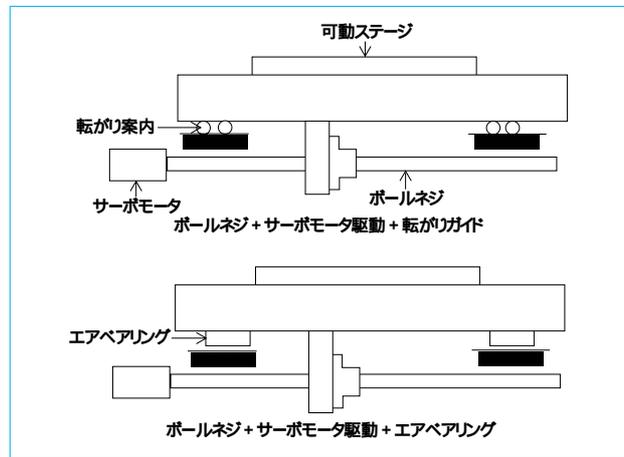


図4 ボールネジ駆動系とリニアモータ駆動系の特性比較モデル
Models of ball-screw drive system and linear motor drive system

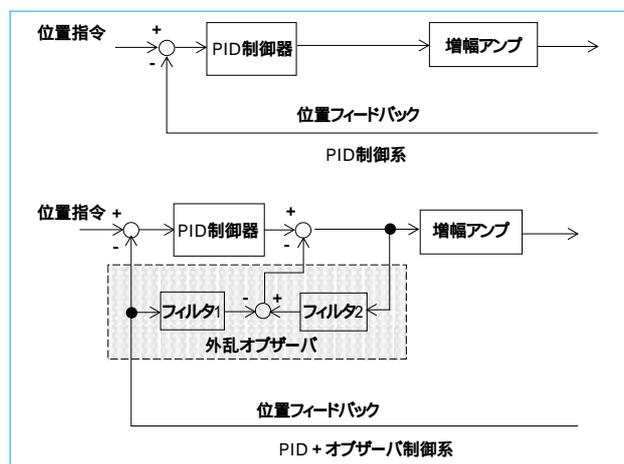


図5 制御系の評価モデル
Models of motion control system

- ボールネジ駆動 + エアベアリングガイド
- リニアモータ駆動 + 転がりガイド
- リニアモータ駆動 + エアベアリングガイド

なお，精密駆動機構の機械系の仕様を完全に一致させることは困難で，ストローク300～400 mm前後，機械系の負荷構成が比較的近いモデルを選定しての比較とした。また，リニアモータはすべてコアレスタイプとし，すべての装置はエア式の除振台に搭載されている。

また，制御方式も駆動方式同様に駆動性能に大きく影響を与えることから，以下の2方式を評価の対象とした。

比例積分微分 (PID) 制御系 (コントローラよりD/Aを介し電流アンプに推力指令)

比例積分微分 (PID) 制御系 (同上) + 外乱オブザーバ
図5に，評価に用いた制御系の構成を示す。

3.2 評価方法と結果

評価項目は，一定速度指令値をシステムに入力した際の位置追従誤差とした。計測方法は，サーボサンプルごとの位置指令値と実際のステージ位置計測値の差を計測し，その3値によって位置追従誤差の変動を評価した。

図6は，エアベアリングガイドとリニアモータ駆動系を有するシステムの応答波形の一例である。比例積分微分 (PID) 制御方式と比例積分微分 (PID) + 外乱オブザーバ構成の両

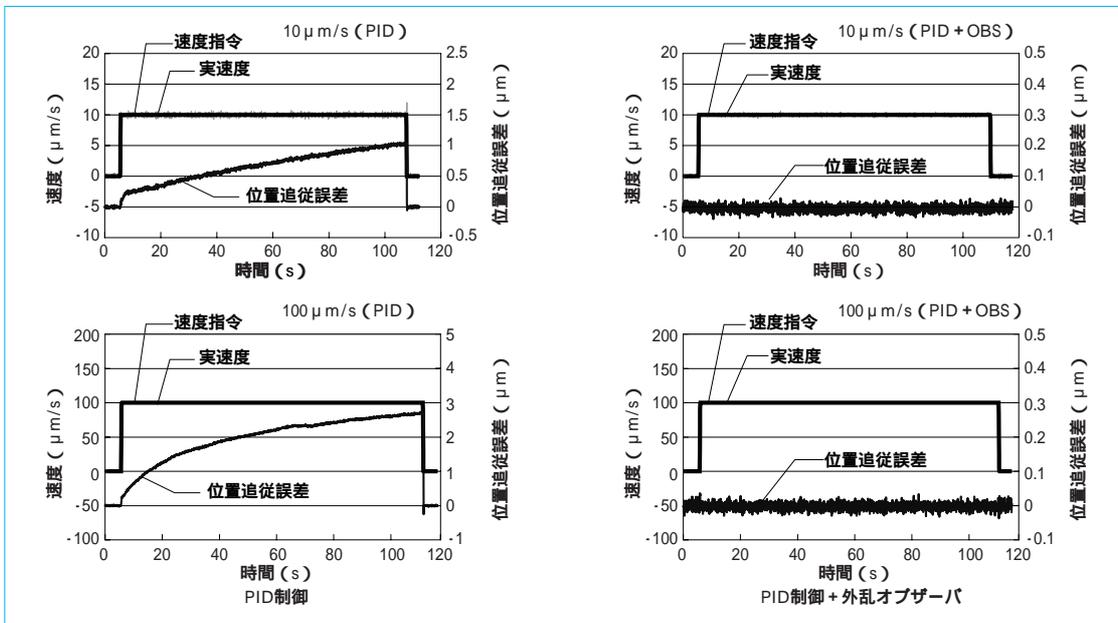


図6 一定速度指令値に対するリニアモータステージの応答例
Velocity responses for constant velocity command

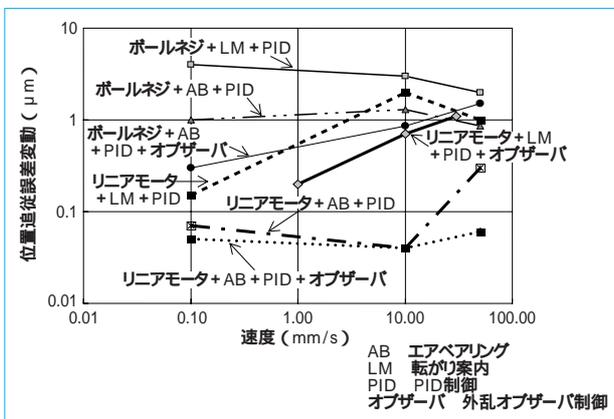


図7 位置追従誤差の評価結果
Evaluated results of following error under scanning motion

制御方式により、微速領域の送り精度を評価した。縦軸（左）は速度指令と実際の速度波形を示しており、また縦軸（右）は、その際の位置追従誤差を示している。速度波形は、指令値に高い精度で追従しているが、ムービングコイルタイプのリニアモータを用いている点もあり、ケーブルテンションの影響が大きく、位置追従誤差が送り開始時点から積分されていく傾向が見られる。このように、リニアモータを用いた駆動系では、その制御方式によってもその応答に大きな差異が出る。

以上述べた方式により、各駆動系構成および制御方式のシステムの送り特性を評価した。図7に、評価結果を示す。

送り速度0.1～50 mm/sの全領域にわたって最も性能が安定している方式は、リニアモータ+エアベアリング方式であり、位置追従精度は50～100 nm以下の領域にある。比例積分微分（PID）制御の場合、50 mm/sの速度指令に対して数百 nmの追従誤差まで悪化するが、オブザーバを適用することにより、ほぼ速度全域での精度確保が可能となる。これが本方式の最大の特徴と考えられる。なお、50 mm/sの領域での誤差はリニアモータの推力リップルおよび除振台の揺れが主

成分であることが確認されている。

リニアモータ+エアベアリング方式を除くと、他の3駆動方式はいずれも速度の増大に伴い追従性能が劣化する傾向を確認できる。この中でボールネジ+転がりガイド方式を除く他の2方式（リニアモータ+転がりガイド、ボールネジ+エアベアリング）は、基本的には一つの転動体を有する構成であり、原理的には近い構成と考えられる。各ユニットの予圧レベルにより摩擦特性が異なることから、定量的比較は困難であるが、速度の増大に伴い転動体の運動周波数が高まることにより、制御系の外乱特性が劣化する傾向が確認できる。なお、このような系ではオブザーバにより外乱トルクの影響を補償することが、系の追従精度向上に効果があることが分かる。

4 むすび

ボールネジ駆動方式とリニアモータ駆動方式を取り上げ、特に電子部品製造装置用の精密駆動機構の視点から両駆動方式を比較評価した。

ここでは特に近年増えてきているスキャニング動作に注目した特性比較について述べた。両方式とも優れた特徴をもつ駆動方式であり、今後ともそれぞれ用途・目的に応じた使い方により共存して行くものと考えられる。

(参考文献)

精密工学会編. 次世代精密精密駆動技術. フジテクノシステム, p.319 ~ 332, p.377 ~ 386, 2000.
井澤實ほか. 精密位置決め技術. 工業調査会, 1989.
A. H. Slocum. Precision Machine Design. Prentice-Hall, 1992.
井澤實. 精密および超精密精密駆動技術の現状. 精密工学会誌, no. 57, Oct., 1991.
島海正樹. 半導体製造装置における精密駆動技術. 精密工学会誌, no. 57, Oct., 1991.
K. Ohishi, M. Nakao, K. Ohnishi and K. Miyachi. Micro-Processor-Controlled DC Motor for Load-Insensitive Position Servo System. IEEE Trans. Ind. Electron, IE-34, 1: p.44-49, 1987.

超小型PETサイクロトロン制御系の開発

Development of Ultra Small Size PET Cyclotron System

越智 俊 昭*
Toshiaki OCHI

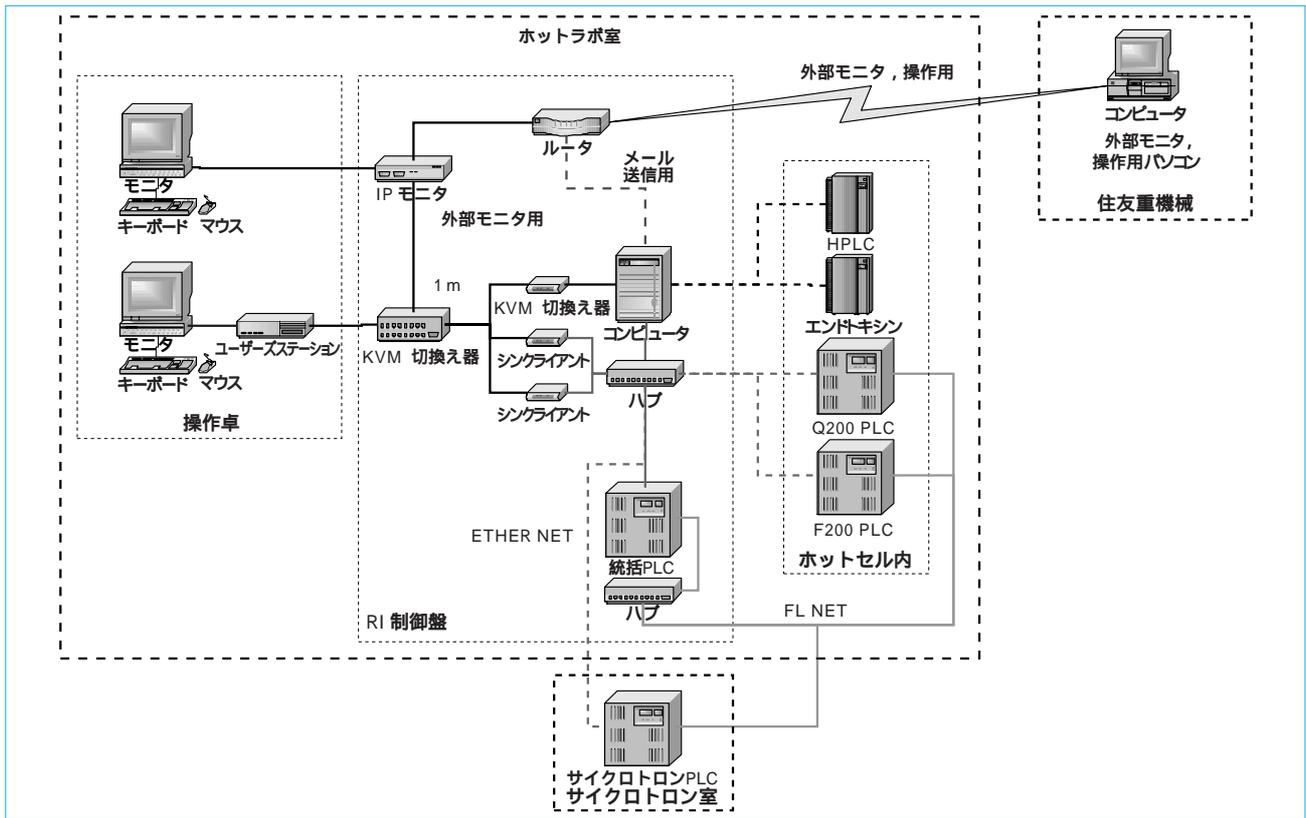


図1 システム構成
System configuration

1 はじめに

当社のPET (Positron Emission Tomography) 用のサイクロトロンは、現在までに多くの納入実績を有している。しかし、サイクロトロンの運転は、朝からの薬液の投与に合わせて、早朝からのサイクロトロンの立上げ、照射・合成装置の準備および合成などの専属オペレータの作業が必要となっていた。

そこで、今回新たに製作した制御装置では、前日に運転計画を立て、サイクロトロンおよび合成装置の準備を行い、自動運転をセットしておけば、翌朝、計画された運転計画にもとづき、サイクロトロンの立上げ、照射、合成装置への回収および合成を自動的に行うシステムを開発した(図1)。

本システムの自動運転機能を使用することにより、オペレータ(薬剤師)が合成完了の時間に合わせて出勤し、品質検定を行えば薬液投与の準備が完了することになり、オペレータの早朝出勤での作業が不要となる。

また、本システムは遠隔モニタリング機能も有しており、装置の状況確認および異常内容の詳細などの情報について現場に専門のオペレータがいなくても専門のスタッフが遠隔から確認が可能であり、専門のオペレータが不要なシステムとなっている。

2 自動運転機能

検査前日の準備作業および当日の自動運転の流れを次に示す。

2.1 検査計画

検査前日に、撮影開始時間、投与開始時間および投与間隔を入力することにより、検査日のタイムスケジュールが自動的に作成される。

また、各時間の患者の有無、患者ごとの投与量を入力することにより、検査日に必要とされるFDG (Fluoro-2-deoxy-D-Glucose薬液)の量が自動的に計算される(図2)。

2.2 運転計画

検査計画にて予定された、検査日のタイムスケジュールから計算されたFDGの必要量より、設備の立上げから投与開始までの運転計画が自動的に計算され表示される(図3)。

本運転計画であれば、オペレータは検定の準備を行う8時10分までに検定準備などの作業を開始すれば良いこととなる。

2.3 運転準備

検査計画および運転計画完了後、翌日の自動運転に備えてオペレータは確認、準備作業を行う。

各装置の正常の確認および合成装置へのカセットのセットなど、自動運転に必要な準備作業を行う。準備作業の必要な



図2 検査計画画面
Display of inspection plan



図4 自動運転画面
Display of automatic operation

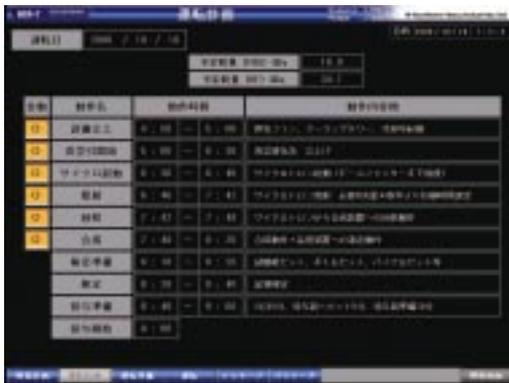


図3 運転計画画面
Display of operation plan

項目に関しては、画面にて確認しながら行い、準備状況を自動またはオペレータの確認入力により確認していく。

2.4 自動運転

運転準備が完了した段階で自動運転の起動を行い、オペレータは帰宅する。

検査当日は、運転計画に従い、機器の立上げ、照射および合成などが早朝から自動的に行われる(図4)。

機器の立上げから照射などの運転が自動的に行われることにより、機器の運転などのオペレータの早朝からの勤務が不要となる。

2.5 状況通知

自動運転中は装置の運転状態などが自動的にメールにて関係者に連絡されるようになっており、装置の運転状態が遠隔にいても把握できるようになっている。

また、装置に異常が発生した場合にもただちに異常発生の一報がメールにて通知される。

この自動運転機能を使用することにより、いままで必要であったオペレータの早朝出勤が不要となる。

3 遠隔モニタリング機能

装置の運転状況の確認および異常発生時の状況確認用の手段として、遠隔モニタリングの機能も有している。

本遠隔モニタリングの機能を使用することにより、詳細な情報が表示されている現場の操作画面の情報をインターネット経由にてモニタリングすることが可能となる。(Avocent CorporationのSwitchView IPを使用) 本機能を使用し、装置

の状況確認および異常内容の詳細などの情報を現場に専門のオペレータがいなくても専門のスタッフが遠隔から確認が可能であり、専門のオペレータが不要なシステムとなっている。

操作のパソコンには、通常の運転に使用する画面の他に、リモートメンテを行う場合に有効となる下記の三つの機能を有している。

各機器の状態をリアルタイムで確認できる。

装置の様々なデータを収集して蓄積できる。

トレンドグラフも装備されており、運転中の変化を確認できる。また、本トレンドグラフの情報はパソコン内のハードディスクに保存されており、過去のトレンドグラフを表示可能な様になっている。

さらに、各機器の使用時間なども管理しており、本情報に基づき適切なタイミングでのメンテナンスなどの計画が可能となる。

装置に異常が発生した場合、異常の履歴を蓄積し、画面から行った操作の履歴を蓄積する機能を有している。

また、不具合発生時の履歴を直接確認することが可能である。

これらのリモートメンテナンス機能を有効に活用することにより、サービスの効率向上やシステムの品質向上などに役立てることができる。

4 おわりに

検査計画から運転計画までを自動にて行うことから、オペレータの手間を省くことができる。

検査前日に機器の準備を行い自動運転をセットするだけで翌朝装置が自動的に運転される機能により、オペレータの早朝出勤を不要とすることができる。

装置の運転状態を現場に行くことなく遠隔にてモニタリング、確認することができることから、専門のスタッフが遠隔から確認およびアドバイスが可能であり、専門のオペレータが不要なシステムとなっている。

今後は、今回超小型PETサイクロトロン用に開発した自動運転および遠隔モニタリング機能を他のサイクロトロンシステムへも発展させていく予定である。

(参考文献)

SwitchView™ IP ユーザー・ガイド. Avocent Corporation, 2003 .

RPD法によるZnO成膜技術

ZnO Deposition System by RPD Method

伊藤 秀彦* 木下 公男*
Hidehiko ITO Kimio KINOSHITA

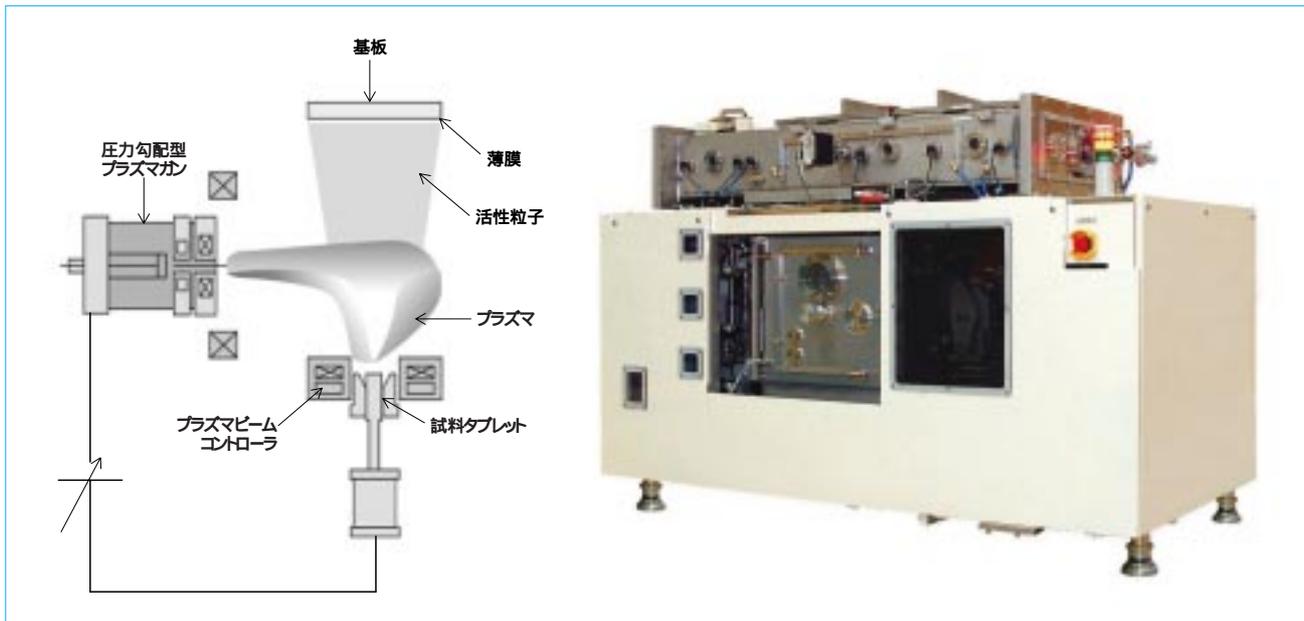


図1 RPD装置
RPD equipment

1 はじめに

太陽電池やFPD (Flat Panel Display) 分野では、酸化錫膜、酸化亜鉛膜および酸化インジウム膜 (ITO膜) などが透明導電膜として用いられてきた。近年、インジウムの資源的な問題から酸化亜鉛系の透明導電膜に関心が集まっており、低抵抗のZnO成膜が可能なRPD (Reactive Plasma Deposition) 法が注目されている。

本報では、RPD法によるZnO成膜技術について紹介する。

2 RPD法の成膜プロセス

RPD法は従来の蒸着法、スパッタ法およびCVD法などの成膜法とは異なる成膜法で、蒸発源の直上に高密度プラズマを集束することで、蒸発材料を昇華し、かつイオン化することで反応性を高めたプラズマ蒸着法である。RPD法を適用した成膜は、圧力勾配型プラズマガンとプラズマビームコントローラ (ハース外周部の環状永久磁石と電磁石で構成) を組み合わせた装置で実現できる (図1)。

圧力勾配型プラズマガンは、Ta管とLaB₆円板との複合陰極と中間電極により、低電圧大電流の直流アーク放電を維持し、高密度 (10^{12} cm^{-3}) のプラズマを生成することができるものである。また、陰極部と成膜室間のオリフィスにより、陰極部の雰囲気圧力を成膜室より高く保つことができ、この圧力差で酸素などの反応ガスの放電部への混入を防いでおり、陰極部への酸素影響がほとんどなく、長時間の連続使用が可

能なものである。

このプラズマガンにより生成したビームを、プラズマビームコントローラにより蒸発材料に導く。このとき、蒸発材料上方にカスプ磁場が形成され、プラズマビームは材料直上に集められて垂直に入射する。ビーム加熱により昇華した材料は、高密度プラズマ中でイオン化される。イオン化率は非常に高く、粒子は活性化される。飛来している粒子はガス粒子などとの衝突でエネルギーを減らしたり、一部は中性粒子となって基板に到達、堆積して成膜される。基板に到達する粒子の平均エネルギーはおよそ10~30 eVであり、成膜室の圧力などの成膜条件によりコントロールが可能である。このエネルギー領域は、膜表面でのマイグレーションに有効である。また、RPD法では、スパッタリング法のように高電圧の印加がないことから、100 eVを超えるような高いエネルギー粒子はプロセス中に存在しない。これらによって、RPD法では緻密で結晶性に優れた膜を実現できる。

3 ZnO成膜装置

ZnO成膜装置では、図2のように成膜室にZnOソースとプラズマビームコントローラを並列に配置することによって、大型基板に対して均一に成膜することができる。要求されるZnOの膜質にもよるが、基板サイズが400 mm幅まではガンユニット1組、400~1100 mm幅までは2組、1100 mmを超えると4組以上を幅方向に並べて構成する。

また、電磁石を調整することにより、蒸発粒子の飛行方向

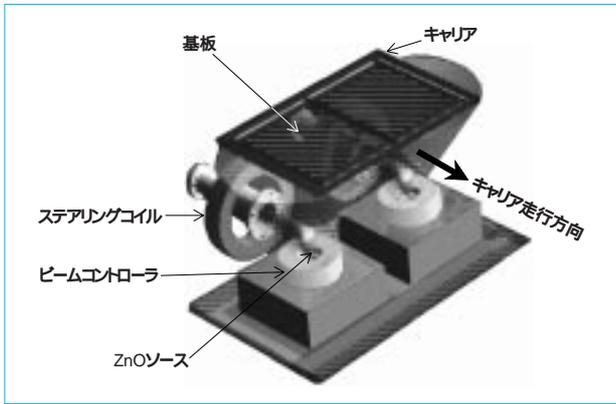


図2 2ガン式RPD蒸発部構成
RPD process composition for two plasma generators

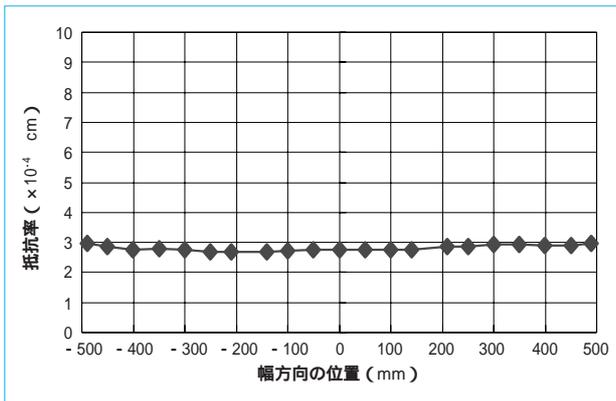


図3 GZO膜の比抵抗分布
Resistivity of GZO film

分布を制御することができ、その作用で膜厚分布を均一化することができる。また、化合物膜の場合にはプラズマの反応性の分布に合わせて基板上の堆積速度分布の制御が可能であり、均一な膜質分布が得られる。

昇華材料は、昇華速度に合わせて自動供給機構により一定速度で供給され、昇華面は常に同じ高さに保たれる。その結果、安定した成膜速度で長時間成膜運転することができる。材料補給は成膜運転を中断することなく、大気側からの追加で補充できることから、長時間にわたって運転を中断することなく操作が可能である。

4 RPD法によるZnO膜の特長

RPD法における酸化亜鉛系導電膜の成膜結果を、図3および図4に示す。蒸発材料には、Ga₂O₃を3wt%添加したZnO焼結体を使用した。成膜中に酸素ガスを供給しながら、200のガラス基板の上に成膜を行った。酸素流量を最適化することにより膜厚200nm、抵抗率 2.4×10^{-4} cm、透過率85%以上(波長400nm~1000nm)のGa添加ZnO膜(GZO)が得られた。また、2ガン型RPD成膜装置を用いて、有効基板幅1000mm、抵抗率 2.8×10^{-4} cm、抵抗率分布 $\pm 5\%$ の均一なZnO系大面積透明導電膜の成膜を実証した。

ZnO膜では、透過率と抵抗率の他に実用上の要求特性に対する適合性が求められる。これらをクリアし、ZnO膜の適用が進むことが期待されている。



図4 RPD法による920×730基板へのGZO成膜
GZO film on 970 × 730 substrate coated by RPD method

5 おわりに

RPD法は、蒸発蒸気のイオン化率が高いことと基板入射時の運動エネルギーが低いことを特徴とする成膜プロセスである。

RPD法では、プラズマガンとビームコントロールユニットを並列に配置することで、大面積基板への成膜が可能である。

RPD法によるZnO膜は、結晶性に優れ、再現性も良好である。

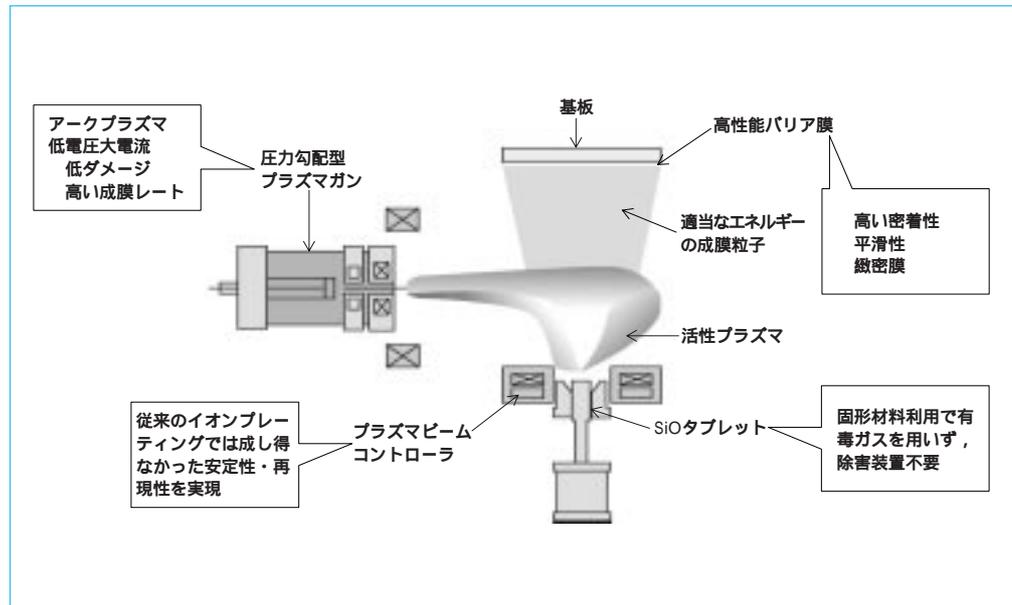
(参考文献)

- 浦本上進. イオンプレーティングのための大電流, 長寿命陰極の研究. 真空, 25, p.66, 1982.
- 田中勝, 牧野博之, 筑後了治, 酒見俊之, 粟井清. 高安定プラズマイオンプレーティング装置による各種成膜技術への応用. 真空, 44-4, p.435, 2001.
- 石橋啓次. スパッタリング法による薄膜形成. セラミックス, 33-10, p.801, 1998.
- 清田淳也. 透明酸化物光. 電子材料第166委員会第6回研究会資料, 1, 1998.
- 山本哲也, 酒見俊之, 粟井清, 白方祥, 碓哲雄, 中田時夫, 仁木栄, 矢野哲夫. 月刊ディスプレイ, 10月号, p.70, 2004.

RPD法によるSiON成膜技術

SiON Deposition Process by RPD Method

伊丹 哲* 三好 陽*
Tetsu ITAMI You MIYOSHI



RPD法によるSiON成膜
SiON deposition by RPD method

1 はじめに

当社は1999年にRPD (Reactive Plasma Deposition) 法を用いたインライン式ITO成膜装置を開発し、発売して以来、ディスプレイ用や太陽電池用の透明導電膜の成膜装置を多数製造し納入してきた。さらにRPD法を適用したSiO系およびZnO系の成膜技術を開発し、従来の成膜法に比べて優れた膜特性および生産性を有する成膜装置の商品化を進めている。

本報では、有機EL (ElectroLuminescence) ディスプレイ用のバリア膜として開発したRPD法によるSiON成膜技術を紹介する。

2 有機ELディスプレイ用の封止構造とバリア膜

有機ELディスプレイは液晶に比べると応答速度が速い、動画が鮮明、バックライトが不要で薄型可能および省エネルギーなどの点で優れたディスプレイとして期待され、各社で量産化の計画が進められている。既に、一部のメーカーで量産が行われており、携帯電話のメインディスプレイやサブディスプレイおよびオーディオ装置の表示器などに適用されているが、本格的量産に向けて各種の課題が現在も追求されている。その課題の中で、有機ELデバイスを水分および酸素などから遮断する封止技術はデバイスの長寿命化には重要な課題である。

現状は、有機ELデバイスと吸湿剤をガラスで密封する構造で封止している。図1 に、一般的なガラス封止の構造例を示す。ELデバイス基板に吸湿剤をセットし、封止用ガラスを接着剤で接合するタイプである。図1 には吸湿剤を省略したタイプの封止構造を、図1 には封止ガラスを用いな

い膜封止構造を示す。膜封止構造はサイズ変更や生産性に優れ、この方法の確立が望まれており、高性能なバリア膜が必要である。

3 RPD法によるSiON成膜技術の特長

無機材バリア膜としては従来Si₃N₄およびSiO_xN_yなどの窒化珪素および酸化珪素膜が使用されており、その成膜方法はプラズマCVD (Chemical Vapour Deposition) が適用されている。CVDは原料ガスに特殊ガスを使用することからこれを除外する装置が必要となる。除外には附着物のクリーニングがバッチごとに必要であり、連続生産にはスタンバイチャンバが必要となることから、設備が大型になる。バリア性を確保するには、1 μm以上の厚膜が必要と言われている。

当社は、生産性に優れ、装置が小型で高性能バリア膜を成膜する装置としてRPD法によるSiON成膜装置を開発した。冒頭の図に、RPD法によるSiONプロセスの概要を示す。また、以下に、その成膜技術の特長を示す。

3.1 高いバリア性

RPD法はアークプラズマによって成膜材料を昇華させ、成膜粒子 (Si, O, N) をイオン化し、適切なエネルギー状態で基板に成膜粒子を堆積させる成膜法である。この方法では堆積後のマイグレーションが活発で緻密な膜が形成され、高性能なバリア性を有する膜が得られる。図2 に、RPD法と他の方法で成膜したバリア膜の密度比較を示す。RPD法でのSiON膜では、2.9 g/cm³の高密度が得られている。この効果により、RPD法による100 nm厚のSiON膜でプラズマCVDによる1 μm程度の厚膜のSiN膜と同等のバリア性能を示している。

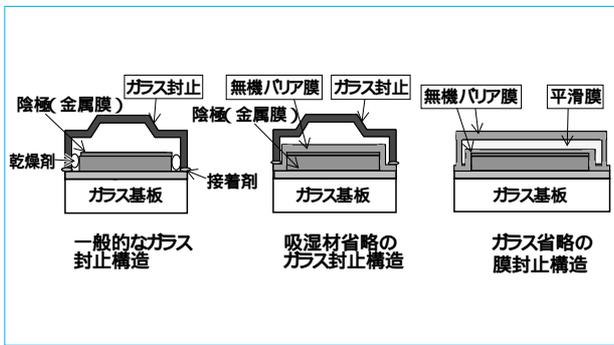


図1 各種封止構造
Various types of encapsulation composition

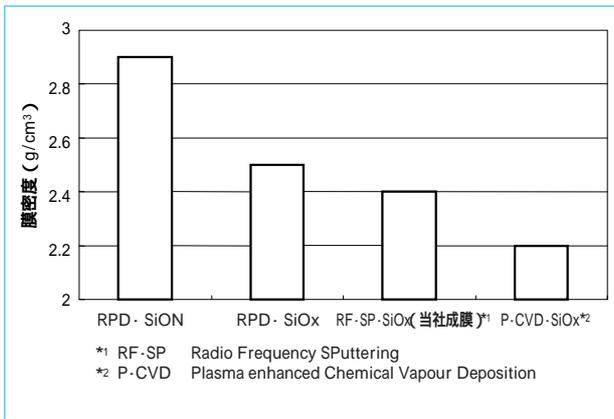


図2 RPD法で得られる膜密度
Density of films coated by RPD process

図3に、樹脂膜と組み合わせた封止膜のCa評価テスト例を示す。温度60℃、湿度100%の環境でCa膜(4mm、200nm厚)が透明になる時間から透過水分量を計算にて求めた。



$$\text{透過湿度} = \frac{\text{透明になった面積比} \times \text{Ca膜厚} \times \text{Ca密度} \times (36/40)}{\text{テスト時間}}$$

なお、透明部の面積比は4mmを100万画素のCCDカメラ測定より求めた。

RPD法によるSiON膜(100nm)ではモコン法の限界である透過湿度=0.02g/m²/day以下を達成し、さらに樹脂膜を組み合わせたと10⁻⁵g/m²/dayレベルの透過湿度を達成している。

3.2 高い生産性

RPD法では、低電圧・大電流アークプラズマをプラズマビームコントローラで蒸発材料に収束させることから、高い蒸発レートが得られる。しかも、低電圧の成膜プロセスであることから、有機膜に対してダメージレスで成膜が可能であり、また安定した高品質膜の生産が可能である。

3.3 シンプルな装置構成

蒸発材料は焼結したタブレット状SiOを用い、プロセスガスは窒素とアルゴンのみを使用しており、ガスの排出に除害装置などは必要なく、シンプルな装置構成である。

3.4 安定した運転性

当社が開発した磁場を組み合わせたプラズマビームコン

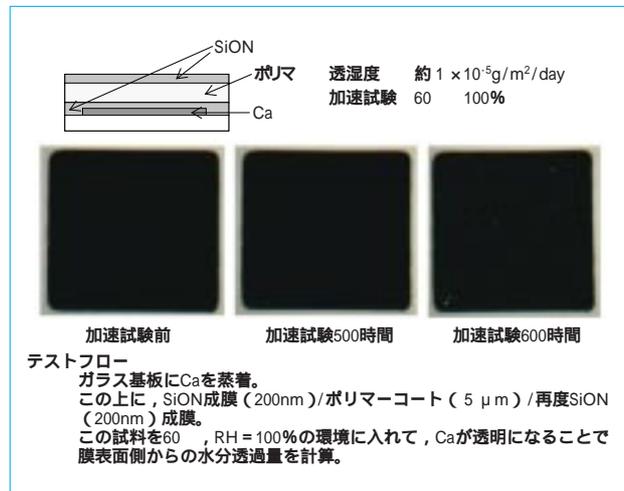


図3 RPD法によるSiON膜を用いた膜封止の透湿度
Permeability of SiON film (RPD) + polymer

ローラによって安定したプラズマ状態が維持され、長時間の連続成膜運転が可能である。

4 RPD法によるSiON成膜装置

有機EL用バリア膜成膜装置として、クラスタ式RPD成膜装置を開発し納入した。既に3.5世代基板対応装置は完成しており、4~5世代基板対応装置を計画中である。

5 今後の課題

有機ELディスプレイのバリア膜、封止膜の要求にこたえるSiON成膜技術の課題を次に示す。

RPD法によるSiON膜バリア特性を改善し、単膜でも十分な透過度が得られる膜を実現する。

生産性向上および低ランニングコスト化を図るべく、成膜レートの増大および材料利用率の向上を実現する。

6 おわりに

RPD法は、低ダメージで膜特性が得られる優れたプロセスである。

RPDによるSiON膜は、高緻密性および高平坦性を有し、CVDによるSiN膜と同等の高いバリア性能を有する。

有機膜上に低温・低ダメージでSiONの成膜ができる。連続放電状態で安定した高品質膜の成膜が可能で、高い生産性を実現できる。

プロセスガスは窒素とアルゴンのみを使用しており、ガスの排出に除害装置などは必要なく、シンプルな装置構成である。

当社が開発したプラズマビームコントローラでプラズマ状態を一定にすることで、安定した長時間の運転ができる。

今後は、この特長を生かして有機樹脂やプラスチックフィルム基板などへ適用を広げていく予定である。

(参考文献)

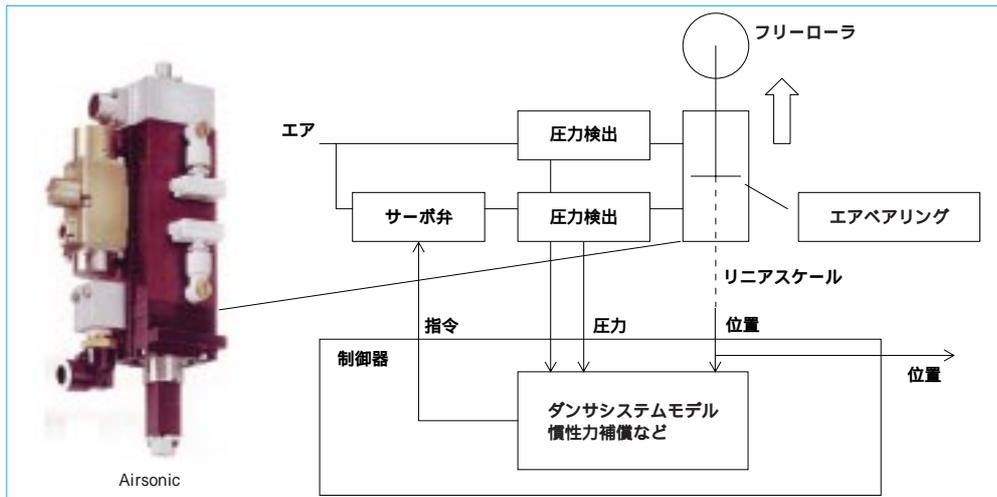
浦本上進. 真空, vol.25, p.66, 1982.

田中勝, 牧野博之, 筑後了治, 酒見俊之, 粟井清. 真空, vol.44, no.4, p.435, 2001.

テンションコントロールシステムの開発

Development of Tension Control System

三好 清人*
Kiyoto MIYOSHI



改良ダンサシステム
Dancer system (Improved)

1 はじめに

近年、FPD (Flat Panel Display) 部材などに代表される高機能フィルムにおいて、携帯性の向上などからフィルムの薄膜化が進んでいる。それによりWEB (フィルムなどの帯状物) にかけられる張力は低下傾向にあり、高精度な張力制御が要求されている。当社では長年にわたり、このWEBの張力制御に取り組んできた。本報では、まずWEB張力制御の方法などについて解説し、次に現在当社が取り組んでいる張力制御システムの改良について紹介する。

2 張力制御の原理

図1に示すフィードローラに挟まれた区間でのWEBの張力Fは、次式で与えられる。

$$F = EA(L - L_0) / L_0$$

ここで、

E: WEBのヤング率 A: WEBの断面積 L: 区間中のWEBパス長 L₀: 区間中WEBの元の長さ

EおよびAはWEB種類により決まることから、張力を制御するにはLまたはL₀を操作する。区間中のWEBパス長Lを操作するには、WEBが通過するローラ配置を変更する。また、区間中WEBの元の長さL₀を操作するには、区間に流入・流出するWEBの量を前後フィードローラの速度差により変更する。

実際のWEB制御においては、図1に示した区間がいくつも連続する。したがって、フィードローラの挙動は少なくとも前後二つの区間の張力に影響を与える。このことから、区間中のWEBパス長Lの操作は基本的にその区間の張力のみに影響を与えるのに対して、区間中WEBの元の長さL₀の操作はその区間の張力のみではなく前後区間の張力にも影響を与える。

3 実際の張力制御

図2に実際に広く用いられている張力制御方式である張力検出器システム、図3にダンサシステム (可動フリーローラが踊っている様に見えることからこう言われる) の概念を示す。

まず張力検出器システムであるが、制御の方法としては、張力検出器によりWEBの張力を検出する。検出した張力と目標張力の差分をPI制御器などの制御器に入力することによりフィードローラ速度操作量を得る。この操作量により前後フィードローラ速度に差をつけ、区間に流入・流出するWEBの量を操作することによりWEB張力を制御する。したがって、張力検出器システムは区間中WEBの元の長さL₀を操作することにより張力を制御するシステムと言える。

次にダンサシステムであるが、制御の方法としては、まずWEBに可動機構を持つフリーローラを押しつけることによりWEBに張力を発生させる。WEBに発生した張力とフリーローラの押しつけ圧が釣り合った時点で、可動フリーローラは停止する。したがって、フリーローラのWEBに対する押しつけ圧をフリーローラ自身の自重あるいはエアシリンダ、エアレギュレータなどで操作することにより張力を制御することが可能となる。これらのことから、ダンサシステムはフリーローラが動くことにより、区間中のWEBパス長Lを操作して張力を制御するシステムと言える。

しかしながら、フリーローラの可動範囲は有限であり、WEBが元々大きくたるんでいた場合、すなわちL << L₀であった場合などでは、張力の釣合いが取られる前にフリーローラが可動範囲を超え、ストッパに当たってしまう場合がある。これを防ぐにはフリーローラに取り付けた位置検出器によりフリーローラの位置を検出し、検出した位置と目標位置 (多くの場合は可動範囲の中間位置) の差分をPI制御器など制御器に入力することによりフィードローラ速度操作量を得

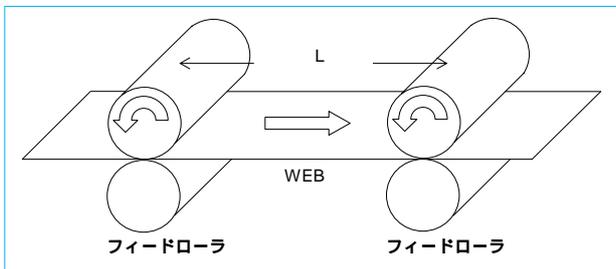


図1 WEBにおける張力区間
Section in WEB under tension

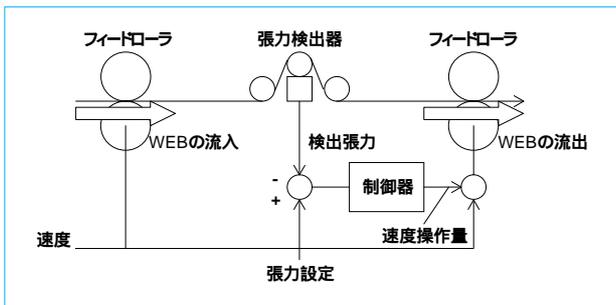


図2 張力検出器システムによる張力制御
Tension control by tension detector system

る。この操作量により前後フィードローラ速度に差をつけ、フリーローラの位置が可動範囲内にあるように制御する。したがって、ダンサシステムは区間中のWEBパス長LおよびWEBの元の長さ L_0 を操作することにより張力を制御する複合システムと言える。

第2章張力制御の原理で述べたように、フィードローラによる区間中WEBの元の長さ L_0 の操作は、その区間の張力のみではなく前後区間の張力にも影響を与える。したがって、より精密に制御する場合、影響を受ける他区間のフィードローラも同時に動かし非干渉化するなどの対策が必要となる。

先に述べたように、ダンサシステムは区間中のWEBパス長LおよびWEBの元の長さ L_0 を操作することにより張力を制御する複合システムである。位置制御器の応答を早くし、ダンサローラが目標位置に良く追従するようにすると、その挙動は張力検出器システムに近づく。逆に位置制御器の応答を遅くするとフィードローラは定常的な張力偏差をゆっくりと制御することとなり、過渡的な張力変動は主に区間中のWEBパス長Lの操作、つまり可動フリーローラの挙動により制御されることとなる。このように張力変動を定常・過渡とに分けて制御できることがダンサシステムの特徴である。

しかしながら、従来のダンサシステムでは可動フリーローラシステムに課題があり、張力定常偏差および張力変動を十分に抑制できないという問題がある。その課題とは、可動フリーローラシステムの慣性力と摩擦力である。可動フリーローラには当然質量があり、動作の際には慣性力が働く。それによるWEBのパネ剛性とダンサシステムの質量の関係から、ある一定以上の周波数のWEB張力変動では可動フリーローラがほとんど動作しなくなる。また、可動ローラおよび押し圧を与えるエアシリンダには摩擦があり、摩擦力を下回る張力では可動ローラが動作しなくなる。

次章ではこれらの課題を解決するべく、現在、当社が取り

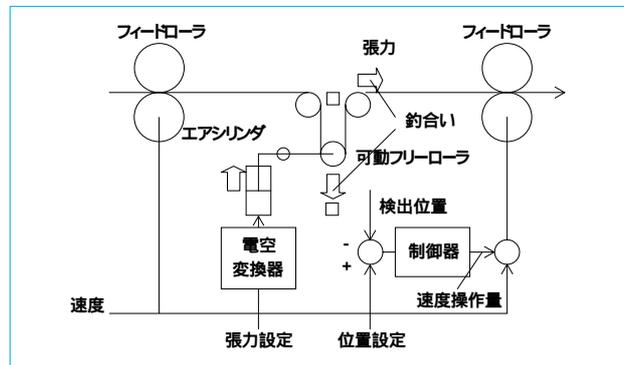


図3 ダンサシステムによる張力制御
Tension control by dancer system

組んでいるダンサシステムの改良について述べる。

4 ダンサシステムの改良

冒頭の図に、現在当社が取り組んでいる改良ダンサシステム概念を示す。このシステムでは、押し圧を与えるエアシリンダには2003年度から当社が上市している高精度エアシリンダシステムAirsonicを用いている。このシリンダシステムの特徴を次に示す。

ピストンロッドをエアベアリングにて保持することにより非接触とし、摩擦力を低減している。

ピストンロッドに高細密リニアスケールを、圧力室に圧力センサを、エア流量制御用にサーボ弁を内蔵している。

上記、および制御器により、高精度な荷重および位置制御が可能である。

これらにより、推力500 Nシリンダ単体で荷重制御範囲10 ~ 500 N、荷重制御精度 $\pm 1\%$ 、位置繰返し制御精度 $\pm 5 \mu\text{m}$ という性能を達成している。このシリンダシステムをダンサシステムに使用し、摩擦を低減することで、従来のダンサシステムに比べ低張力まで対応可能となる。また、高細密位置検出器から位置情報を得て可動フリーローラ質量にかかっている加速度および慣性力を計算し、アクティブにキャンセルすることにより、ダンサシステム使用可能周波数帯域を広げることが可能となる。

5 おわりに

WEB張力制御では、次の問題点があげられる。

- 張力検出器システムでは、張力制御を行うことにより前後の張力区間に影響を与える。
- ダンサシステムでは、慣性力と摩擦力の影響により張力定常偏差および張力変動を十分に抑制できない。
問題を解決するダンサシステムの改良として、次の取り組みを行った。
 - ダンサシステムピストンシリンダの摩擦力を低減する。
 - 空気圧力の積極制御による慣性力を補償する。

当社では、これからも張力制御に限らずWEB制御全般にわたり、その高精度化に取り組んでいく所存である。

(参考文献)

JSR株式会社筑波研究所. アートン薄膜位相差用フィルム. JSRテクニカルレビュー, no.110, p.26 ~ 29. 2003.

高周波PWMドライバ SDPDの開発

Development of High Frequency PWM Driver SDPD

白石 貴司*
Takashi SHIRAISHI



図1 高周波PWMドライバ SDPD
High frequency PWM driver SDPD

1 はじめに

従来、高速および高応答が求められるスキャナやヴォイスコイル制御には、リニアアンプが適用されることが多かった。リニアアンプは高い制御性能を得られる反面、損失による発熱が大きいことから装置の大型化を余儀なくされるという欠点がある。昨今、オーディオアンプの世界ではD級方式と呼ばれる高周波PWM（Pulse Width Modulation）制御によって、リニアアンプに迫る性能と低損失化を両立した製品が台頭している。

当社では、D級方式技術を応用した高性能アクチュエータ駆動ドライバSDPDを開発した（図1）。

本報では、SDPDシリーズドライバのラインナップと性能面での特長を中心に紹介する。

2 高性能PWM型ドライバ SDPDシリーズ

SDPDシリーズは50～500 Nクラスの小型アクチュエータ向けに開発したPWM型サーボドライバで、出力電流8～40 Aの全4シリーズをラインナップした。アクチュエータはヴォイスコイル型や回転型にも対応し、位置センサはAB相パルスをはじめ、各社省配線型インクリメンタルおよびアブソ

リュート型エンコーダにも対応した。上位制御装置とのインタフェースは、当社製PWMドライバSDPHシリーズと互換であり、位置指令パルス列入力、速度アナログ入力、推力アナログ入力、速度デジタル入力および推力デジタル入力の5系統を標準装備している。SDシリーズドライバ専用の調整支援アプリケーションSDSAにより、メンテナンス性も大幅に向上した。表1に、SDPDシリーズドライバラインナップおよび主要仕様を示す。

3 特長

3.1 電流制御系

一般的にフィードバック制御系において、低域でのループゲインが不足すると停止精度が悪化し、高域の周波数特性が悪いと指令追従特性が悪化することが知られている。高精度および高応答を要求されるアプリケーションにおいては、電流制御の特性が必要な帯域までフラットに伸びた周波数特性が必要とされる。SDPDシリーズドライバの電流制御部は、デジタル方式よりも高利得化が可能なアナログフィードバック方式を採用した。図2に、SDPD・025とC社製ヴォイスコイルモータ型アクチュエータを組み合わせた場合の周波数応答特性例を示す。

3.2 高速スイッチング化技術

低損失トランジスタと高速ゲートドライバ集積回路の採用により、PWM周波数を従来の当社製ドライバの約5倍である100 kHzの高周波数にスイッチングし、電流リップルおよび電流応答帯域を大幅に改善した。

3.3 電流ゲイン設定変更用ロータリスイッチ

従来、アナログ電流制御器ではモータとの組み合わせによって変化する周波数特性を最適化するには、制御ゲインと位相特性を決める偏差増幅器に使用される回路部品の定数変更が必要であった。SDPDでは独自のゲイン調整機構によるロータリスイッチを採用し、周波数特性を16段階に設定できる機能を搭載した。図3に、ロータリスイッチ設定に対する周波数応答特性の変化をプロットした例を示す。本機能によりアクチュエータとの電流特性マッチングが容易となり、さらにユーザが簡単に微調整を行うことが可能となった。

3.4 調整支援アプリケーションソフトウェア SDSA

SDSAは、当社製SDシリーズドライバに共通で使用可能なWindowsアプリケーションソフトウェアである。

3.4.1 リアルタイム波形モニタ機能

速度および推力などの検出値および内部演算値を、リアルタイムにグラフ表示する機能を搭載した。この機能により、オシロスコープなどの測定器を使用することなく、サーボ調整が可能となった。

表1 SDPDシリーズドライバのラインナップおよび主要仕様
Lineups and major specifications of SDPD series drivers

	SDPD-004	SDPD-008	SDPD-012	SDPD-025	SDPD-040
電源電圧	±DC24Vまたは±DC48V				
定格出力電流 (A rms)	0.9	1.9	2.8	5.9	9.4
瞬時最大出力電流 (A rms)	2.8	5.7	8.5	17.7	28.3
瞬時最大出力電流 (A peak)	4.0	8.0	12.0	25.0	40.0
PWMスイッチング周波数	100 kHz				
適応アクチュエータ	VCM, DCサーボモータ 3相リニアモータ ACサーボモータ				
エンコーダ入力	ラインドライバ形式 (RS-422) 標準仕様 最大カウント周波数 2 MHz (4 通倍後) 高速エンコーダ対応仕様 最大カウント周波数 40 MHz (4 通倍後) インクリメンタルエンコーダおよびアブソリュートエンコーダ対応				
エンコーダ電源供給	5 V 最大350 mA				
通信機能	RS-232C通信によるパラメータ設定				
表示	7segLED2桁表示 (動作状態表示 アラーム表示)				
モニタ出力機能	2CHアナログモニタ (推力 (トルク), 速度他) ±10 V 8 bit分解能				
入力信号	RDY/RST, +OT, -OT, LS信号入力 (パラメータで機能選択可能)				
出力信号	アラーム出力 ドライブレディ出力 ブレーキ解除出力				
指令入力形式	アナログ指令入力 (推力 (トルク) / 速度指令) デジタル指令入力 (位置パルス列) デジタル指令入力 (推力 (トルク) / 速度指令)				
位置出力信号	A相, B相, Z相出力 ラインドライバ形式 (RS-422 パルス分周機能なし) エンコーダがAB相方式入力の場合のみ対応				
保護機能	電源電圧低下, エンコーダ断線, 過負荷, 過電圧, 低電圧, 過電流, オーバーヒート他				
その他機能	ダイナミックブレーキ 相検知 (センサレス磁極位置検出)機能 デジタルフィルタを2段階 (ノッチ/ローパスを任意設定可能)				

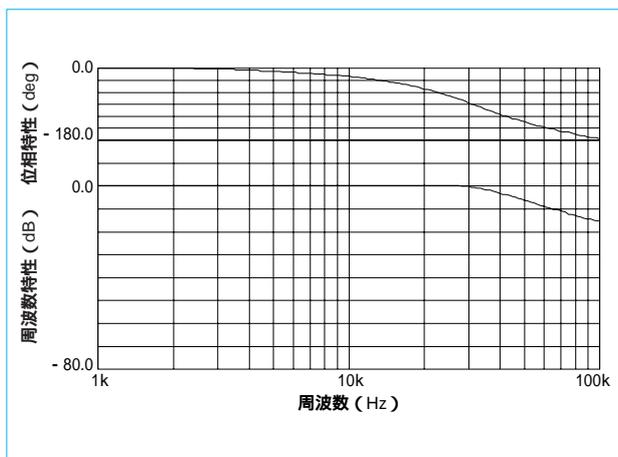


図2 周波数特性例 SDPD + ヴォイスコイルモータ
Example of frequency response for SDPD + voice coil motor

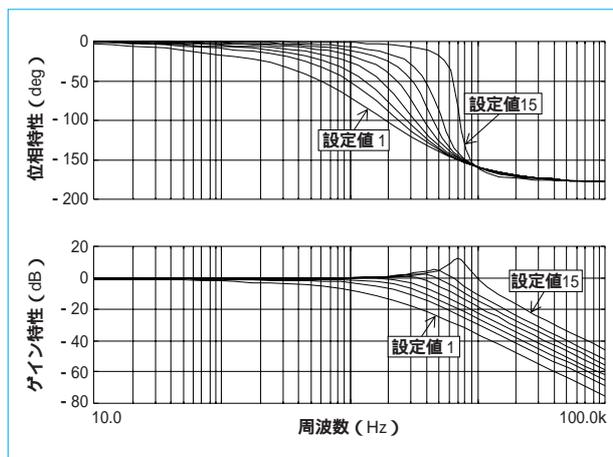


図3 電流ゲイン調整ロータリースイッチ変更時の周波数特性シミュレーション
Frequency response by rotary switch of current feedback loop gain

3.4.2 高速データサンプリング機能

検出値・内部演算値を最高10 kHzでサンプリングし、CSVファイルとして保存できる。これは一般的な表計算ソフトに読み込める形式であり、データ解析などに利用できる。

3.4.3 ローカル運転機能

SDSAでは、モータと位置検出器のみ接続されていれば、他にI/O信号を接続しなくても簡単に試運転が可能である。この機能により、出荷調整時や上位装置が非稼働状態であっても効率的な立上げ作業が可能となった。

3.4.4 その他の機能

上記機能の他に、パラメータ編集機能、I/Oモニタ機能、メモリダンプ機能およびアラーム履歴参照機能などを有しており、メンテナンス作業を強力にサポートする。

4 おわりに

SDPDは、市場から要求されている高精度化および高速化に対応したアクチュエータドライバである。

高精度および高応答なアクチュエータドライブ技術は、半導体の微細化や新しいプロセスへの対応および液晶パネルの生産性向上などを実現するコアコンピタンスとなっている。

今後は、より高性能化への技術開発を継続するとともに、装置全体まで含めたより広範囲の最適化に貢献するコンポーネント開発にも積極的に取り組んでいく所存である。

サーボドライバ GS-200の開発

Development of Servo Driver GS-200

木根原 慎一* 千々岩 敏彦*
Shinichi KINEHARA Toshihiko CHIJIWA



図1 サーボドライバGS-200
Servo driver GS-200

1 はじめに

近年、機械装置の高性能化およびコンパクト化に伴い、小型サーボドライブに対する需要が急増している。サーボドライブ需要は2001年度1600億円規模であったものが、2004年度には2300億円規模にまで増大している。従来は汎用インバータと誘導モータの組み合わせで駆動していたような装置においても、高タクト化および高精度化を追求し、サーボドライブへの切り換えが進んでいることが主要因である。また、誘導モータと比較した場合のサーボモータの大きさや効率の良さもこの切り換え現象を後押ししている。コンパクトな装置を設計する上で、アクチュエータの小型化は必須の条件となってきた。

このような市場の変化に対応するべく、当社においては既にサーボドライバGS-100を市場投入しているが、市場は更なるドライバのコンパクト化や低コスト化を要求している。今回、これら市場要求にこたえて、GS-100よりも更なる小型化および低価格化を狙ったサーボドライバGS-200を開発した(図1)。

2 GS-200の特長

GS-200は、現在200Vクラス100W、200W、400Wおよび750Wをシリーズ展開した(表1)。制御方式として、正弦波PWM(Pulse Width Modulation)制御方式および回転座標変換電流制御方式を採用し、高性能化を実現した。さらに高性能CPUの採用や高速IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールおよび高速ゲートドライブ回路を採用することにより、高精度化を達成した。モータの速度・位

置検出器にはコストを考慮し、標準では省線インクリメンタルエンコーダを採用しているが、オプション対応により高分解能エンコーダにも対応可能な設計とした。17ビットエンコーダをオプション選択することにより、更なる高精度化も可能となる。また、近年数多くの案件において要求のあるCEマーキングにも対応した。

GS-200のターゲット市場としては、近年サーボ化が急激に進んできた印刷機械、搬送物流システム、食品機械、繊維機械および包装機械があげられる。これらの業界は、汎用インバータからサーボドライブへの置換えが進んでいる市場である。パラメータ設定器としては、汎用インバータとの親和性を持つカタカナ表示が可能なオペレーションユニット(Operation Unit OPU)を採用した(図2)。

3 小型化および低コスト化への取り組み

GS-200の開発にあたっては、小型化および低コスト化を実現するべく、様々な方式に取り組んだ。ここではこれらの項目を紹介する。

OPUは、一度調整すれば不要となる。このことから、OPUはオプション対応とした。

アラームおよび状態表示は、五つのLEDで表現した運転状態の確認および異常状態の確認も最少限の表示機能で実現した。

モータ制御用CPUのペリフェラル機能を最大限に活用し、無駄な外部回路を削減した。

標準仕様の指令は、パルス列入力および多段速に特化した。ただし、アナログ速度指令入力への要求にこたえて、アナログ入力オプションを用意した。

接点入力や接点出力の多機能入出力化による入出力接点を削減した。各接点の機能は、OPUにて容易に変更可能とした。

筐体の材質をステンレスとし、塗装を不要とした。

パワー部とコントロール部を1枚基板構成とした。

整流ダイオードモジュール、主回路IGBTモジュールおよび回生ブレーキ用IGBTモジュールを一つのパッケージに収めたPIM(Power Integrated Modules)を採用した。

HVIC(High Voltage IC)およびブートストラップ電源を採用した。これらにより、従来4電源出力のトランスと6個のフォトカプラ+ゲート駆動回路で構成されていた回路ブロックを1電源出力のトランスと3個のHVICに置き換えた。これにより、回路ブロックの省サイズとコスト低減を実現した。省回路によるパターンレイアウトの容易化も基板の省サイズに寄与している。さらに、HVICは従来方式のフォトカプラと比較し、伝達遅延が非常に小さいという特長がある。この特長を生か

表1 主要仕様
Major specifications

サーボアンプ形式 GS2002-	A10	A20	A40	A75
適用モータ (kW)	0.1	0.2	0.4	0.75
連続出力電流 (A rms)	1.2	2.2	4.3	5.0
最大出力電流 (A rms)	3.6	6.6	12.9	12.5
入力電源	3相 AC200~230V ±10% 50/60Hz			
制御方式	正弦波PWM制御・電流制御方式			
フィードバック方式	省配線インクリメンタルエンコーダ(エンコーダパルス数 2000パルス)			
入出力信号	シーケンス入力(6点)	6種類の入力信号を選択可能 サーボオン, 正転駆動禁止, 逆転駆動禁止, リセット, 制御モード切替え, サーボロック, 指令パルス阻止, 位置偏差クリア, P動作, 多段速1, 多段速2, 多段速3, 位置Pゲイン切替え, 速度PIゲイン切替え, 回転方向切替え, トルク制限切替え, 加減速切替え, 非常停止(A接点), 非常停止(B接点)		
	シーケンス出力(3点)	3種類の出力信号を選択可能 サーボアラーム, サーボレディ, モータ回転中, 位置決め完了, ブレーキ開放, 電流制限中, 速度検出, 速度到達		
	位置信号出力	A, B, Z相 ラインドライバ出力		
内蔵機能	回生処理機能	回生抵抗器内蔵		
	オーバトラベル防止機能	正転駆動禁止または逆転駆動禁止動作時にフリーラン停止		
	電子ギヤ	0.01 < A / B < 100		
	内部速度設定機能	内部8速設定可能		
	保護機能	過電流, 過電圧, 不足電圧, 過負荷, 過速度, パワーモジュールエラー, エンコーダ断線, 偏差カウンタオーバーフロー, 外部異常, EEPROMエラー, 欠相, エンコーダ通信異常, 回生抵抗器過負荷		
表示	LED表示 (STATUS, ALARM1~4)			
環境 使用条件	使用温度・保存温度	使用温度 0~50 保存温度 -20~+65		
	使用湿度・保存湿度	90%RH以下(結露のないこと)		
	標高	海拔1000m以下		
	耐振動・耐衝撃	耐振動 4.9 m/s ² 耐衝撃 19.6 m/s ²		
構造	ブックマウント形			
概略質量	1.0 kg		2.0 kg	



図2 OPU



図3 ACサーボギアモータ
AC servo gearmotor

し, IGBTモジュールの上下アームの短絡防止時間を短縮し, 高精度化を達成した。

高性能ギアとコンパクトなサーボモータを直結したギアモータにより, 一層の相乗効果を図った(図3)。

4 今後の機種展開

市場からの要求もあり, 下記シリーズを順次追加リリースしていく予定である。

アナログ指令入力オプション

アナログ速度指令を用いるユーザに対応して, 汎用アナログ入力と高精度アナログ入力の二つのオプションを選択可能とする。

高精度エンコーダオプション

標準の省線インクリメンタルエンコーダでは, 精度が不足するユーザに対応して, 17ビット絶対値エンコー

ダと17ビットインクリメンタルエンコーダ対応のオプションを開発する予定である。

制振制御

機械共振をソフトウェアにて抑制する機能であり, ギアモータのギア鳴り現象の低減にも効果を発揮する。現状は2段のノッチフィルタを実装しているが, さらにアクティブな制振制御を開発中である。

リニアモータ駆動

当社の保有する高精度リニアモータラインナップとの組み合わせを実現する。当社保有技術である相検知機能の実装により対応可能である。

1.0~3.7 kWまでの容量拡張

パラメータコピーユニットおよびパソコン通信の開発
その他海外対応として, 以下に取組み中である。

400Vクラスの開発

UL規格の取得

5 おわりに

小型, 低価格および高精度というサーボドライバへの市場ニーズからGS-200(100~750W)を開発し, リリースした。

現在, 本製品の小型・低価格・高精度という特長と高性能ギアとコンパクトなサーボモータを直結したギアモータにより, 相乗効果をあげている。

今後も, ユーザニーズにこたえてGS-200シリーズの充実
に努めていく所存である。

RI製造システム CYPRIS HM-7

RI Manufacturing System CYPRIS HM-7



がん細胞の発見を主な目的としたポジトロン断層撮影 (Positron Emission Tomography PET) 検査に使用する放射性同位元素 (RI) の製造システムとして、CYPRIS HM-7 を開発した。本システムは、放射性薬剤 $2\text{-}[^{18}\text{F}]$ フルオロ- 2- デオキシ-D-グルコース ($2\text{-}[^{18}\text{F}]$ FDG $2\text{-}[^{18}\text{F}]$ fluoro- 2- deoxy-D-glucose) の製造を主目的とし、 ^{11}C 放射性薬剤の製造および将来的には ^{15}O 放射性薬剤の製造も可能である。当社は、既にRI製造システムとしてCYPRIS HM-18, HM-12 およびHM-10の3機種を揃えている。HM-7は従来機種に比べ、低価格、コンパクト性および操作容易性を特長とするRI製造システムである。本体のフットプリントを小さくするべく、放射線遮蔽の自己シールドの小型化およびサイクロトロン本体とホットセルの一体型構造を実現した。また、従来機では専属操作者が早朝より製造システムの操作を実施する必要があったが、HM-7では自動運転および遠隔監視により専属操作者が不要となる画期的なシステムとなっている。

特長

HM-7は、プロトンおよびデュートロンを標準で加速することができる。取出しエネルギーは、プロトン7.5 MeV、デュートロン3.75 MeVである。また引出しビーム電流値は、プロトン $70\ \mu\text{A}$ 以上、デュートロン $30\ \mu\text{A}$ 以上である。

本体重量は、自己シールドを含めて30 t以下で、全体

サイズは、 $2800\ (\text{W}) \times 1600\ (\text{D}) \times 2100\ (\text{H})\ \text{mm}$ であり、顧客病院の建屋コストを最少にするよう非常にコンパクトに設計されている。

RIを製造するターゲットは3本を備え、そのうち1本はガスターゲット専用、残り2本はガスまたは液体ターゲットとして使用できる。

真空排気用ポンプはクライオポンプおよびドライポンプを使用し、安定運転を保証する清浄な真空を実現している。

HM-10と互換性があり、実績のある構造部品を使用することで信頼性を確保するとともに、予備品や消耗品の共通化を行って、在庫品の削減や即納化に対応している。

カセット式FDG合成装置(F200〔本報15頁参照〕)との連動装置により、加速器の起動からFDG合成完了までを全自動で行うことができる。また、自動で起動停止を行えることにより、休日や夜間の電力消費をゼロにでき、ランニングコストの削減に寄与する。

運転中の異常発生時にはリアルタイムに異常を検出して、装置担当者にメールにて情報が自動配信される。これにより、異常時の迅速な修復対応が可能となっている。

(量子機器事業部 川間 哲雄)

自動品質管理装置 Q200

Quality Control System Q200



自動品質管理装置は、操作者が放射線に被曝することなくFDG (^{18}F FDG 2- ^{18}F fluoro-2-deoxy-D-glucose) などのPET (Positron Emission Tomography) 薬剤の分注および品質検定の装置である。本装置では薬剤の分注機能と品質検定機能を分離し、それぞれ別々のホットセルに収納することで、省スペースおよび低コストを実現している。これにより、合理的な薬剤ハンドリングが可能となった。検定項目の自動化および改良により、合成ごとに実施するFDG検定項目のうち、放射能減衰後に実施する無菌試験を除いて全て自動化され、全く被曝することなく検定を行うことが可能となった。

主要仕様

分注機能

最大原液放射能	55.5 GBq
最大原液液量	30 mL
分注精度	± 10 %以下 (分注液量0.5 mL以上)
分注時間	4分以内

検定機能

放射能測定	液量測定
性状確認	(CCDカメラによる)
pH試験紙滴下	アルミニウムイオン試験紙滴下
TLC試験紙滴下	(CCDカメラによる自動撮影)
半減期測定	
放射化学的純度測定	(ラジオ液体クロマトグラフ)
エンドトキシン測定	
製造記録	品質検定記録自動作成

特長

放射能測定にC型電離箱を採用し、合成直後のFDG放射能全量からシリンジ分注に対応する放射能までの広い範囲の放射能測定が可能である。

分注ユニットに市販のディスポーザブル5連3方活栓と10 mLシリンジを使用し、ランニングコストを最少限にすることができた。

分注バイアルの取出しには、23 mm厚さのタングステンバイアルシールドと鉛遮蔽を搭載した台車を使用している。これにより、薬剤投与器へ持ち運ぶ際の被曝に対する安全を確保するとともに、バイアルハンドリングがより容易となった。

Kriptifix222濃度を検定するTLC試験に対してカラスボットテストを採用し、従来手動で行っていたシリカゲル上の展開、発色をなくした。これによりTLC試験紙への滴下直後にKriptifix222濃度の判定が可能となった。

エンドトキシン測定において、サンプル滴下、攪拌、ゲル化時間の測定、エンドトキシン濃度の算出および結果記録、印字の一連の操作を全て自動化した。

FDG薬剤の製造記録および検定記録を自動作成する機能を搭載し、測定結果の自動入力により帳票作成がより容易となった。

(量子機器事業部 甲村 巖根)

新型ホットセル

New Hot Cell



PET (Positron Emission Tomography) 用の薬剤製造システムで使用するホットセルでは、内部に収納する放射性薬剤自動合成装置や分注装置で使用する放射性同位元素からの被曝を低減させる遮蔽効果、薬剤合成の環境として要求されるクリーン環境および非密封放射性同位元素のホットセル外への飛散防止の気密性と空調性能の3点が要求されている。使用する放射性薬剤自動合成装置の種類や取り扱う放射性同位元素の数量に対し、適切なホットセルを選定し納入している。

現在の主力薬剤であるがん診断薬剤 ([¹⁸F] FDG 2-[¹⁸F] fluoro-2-deoxy-D-glucose) の場合、放射性薬剤自動合成装置としては、連続で合成する場合の被曝低減とトラブル発生時のバックアップに2台設置することが一般的であるが、それには、従来のホットセルの商品構成ではFDG自動合成装置を1台収納したホットセルを2組設置する必要があった。

そこで、新型ホットセルでは基本性能を維持しながら従来のホットセルを2台連結することで、1台のホットセルで2台の放射性薬剤自動合成装置を収納可能にした。セルは4室あり、左右の上段のセルに自動合成装置を設置できる。従来の機器構成と比較して、部品の共用化により小型軽量化とセル室の容積アップを実現している。

なお、従来のホットセルと同様に合成した放射性薬剤を分注する機能も標準で装備していることから、自動品質管理装置や放射性薬剤投与器と組み合わせることで、最大限の被曝低減効果を期待できる。

主要仕様

- 外形寸法 1500(W)×810(D)×2200(H) mm
- 遮蔽能力 鉛遮蔽厚さ 60/75 mm (いずれかを選択)
- 最大使用可能放射能 (FDG合成時) F・インプット量 111/222 GBq (遮蔽厚さによる) FDG合成量 67/133 GBq (遮蔽厚さによる)
- 重量 6600/6700 kg (遮蔽厚さによる。従来機の約80%に低減)
- セル個数 4室 (放射性薬剤自動合成装置用2室 分注装置用1室 放射性廃棄物保管用1室)
- 主扉 片開き手動扉 4枚
- 放射性薬剤取出し用子扉 1枚 (左下の主扉に設置)
- 放射性薬剤自動合成装置用セル寸法 630(W)×650(D)×545(H) mm
- 分注装置用セル寸法 630(W)×650(D)×500(H) mm (1室)
- 放射性廃棄物保管用セル寸法 630(W)×650(D)×500(H) mm (1室)
- クリーン対応 HEPAクリーンユニット 風量0.6 m³/min 3台設置
- 排気プロア 8.0 m³/min (50 mmH₂O) 2台設置
- 飛散防止機能 気密用モータダンパ 3台設置
- 内部状態確認方法 LED照明 + 小型カメラによる

(量子機器事業部 片岡 昌治)

イオンビームスキャンニング電源

Ion Beam Scanning Power Supply



当社のスイッチング電源（定電流直流電源 単極性）は、ドロップ型電源に対し50%以上の小型化、定格電流に対して5 ppmの高安定度、最低電流0.1%から運転できる制御範囲の広さおよび CISPR Class Aをクリアする低電磁ノイズの4点が特長である。これらの特長が評価され、高精度な磁場が必要な研究所向けの電磁石電源、半導体イオンインプラント装置用電磁石電源、成膜装置用プラズマ電源、そして医療加速器用電磁石電源として多数使用されている。

今回紹介するスキャンニング電源は、当社で製造した初めての両極性出力電源である。

負荷のスキャンニング電磁石はターゲットにイオンビームを一樣にスキャンする交流磁場を発生させるものであり、その電源の出力電流波形には100 Hz以上の早い繰返し、再現性、そして高い直線性が要求される。

今後はイオンインプラントや陽子線治療装置などの大型スキャンニング装置への採用が期待されており、現在はより大型の ± 400 A/350 V出力の電源を製作している。

主要仕様

電気的仕様

三角波出力電流	± 200 A
最大繰返し周波数	200 Hz
最大出力電圧	± 150 V

直線性	$\pm 0.1\%$ (200 A $\pm 95\%$ 範囲内)
受電電圧値	AC220V $\pm 10\%$ 50/60 Hz 三相3線式
出力制御方式	スイッチング方式
構造的仕様	
構成	充電電源 + アンプ (充電電源1台に対し複数台のアンプを接続可能)
外形寸法	EIA 19インチラック高さ2000 mm (アンプ2台 充電電源1台)
冷却方式	空冷方式 (前面吸気 背面排気)

特長

インバータ回路にHブリッジを採用することにより、交流電流（電圧）を出力でき、また極性変更を伴う電流増減をスムーズに行うことができる。

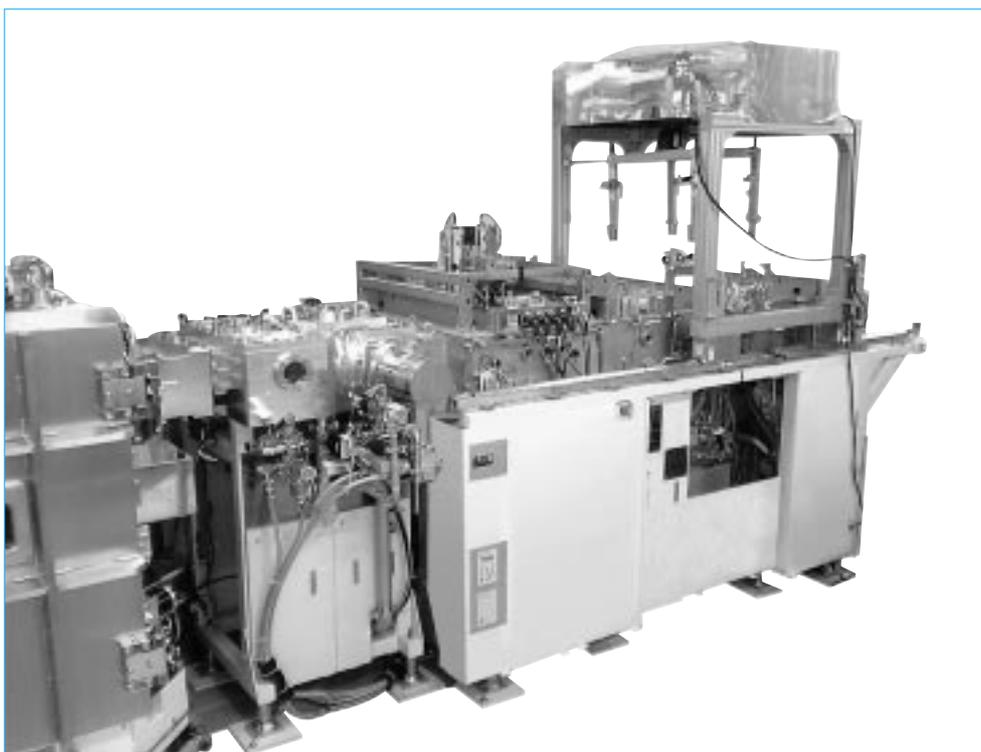
エラーアンプ回路にカスケード型フィードバックを採用し5 kHzまで制御ゲインを有していることから、200 Hzの三角波状交流電流を出力できる。

出力フィルタに新規設計のフィルタを採用することにより、スイッチングリップルがモータ制御用市販アンプより一桁低い100 mV以下となっている。

(量子機器事業部 岩永 慎二 原 章文)

クラスタ式RPD成膜装置

Cluster Type Reactive Plasma Deposition



RPD (Reactive Plasma Deposition) を適用したクラスタ式成膜装置を紹介する。

本装置は多層成膜、複合成膜のユーザ要求にこたえて、多くの実績を有するインライン式RPD成膜装置の技術をもとに開発されたもので、ITOとSiONのRPD成膜に適用できる装置である。多角形のクラスタ室に成膜ユニットと基板処理ユニットを真空結合して複数のプロセスフローを構成することが可能で、RPD成膜法と他の成膜法を組み合わせた成膜システムも実現可能なものである。

クラスタ室に接続されるRPD成膜ユニットは、バッファ室とプラズマコーティング室で構成され、各チャンバ間の基板移動はロボットでハンドリングされ、さらにオプションでマスクやマスクトレイもロボットハンドリング可能である。

成膜ユニットの入側部にマスクアライメント機能を設置して、基板とマスクの脱着とアライメントを行っており、マスク付き成膜ができる。成膜部では基板をシャトルに搭載し、シャトルを走行させて移動成膜を行うことから、膜厚・膜質が均一な成膜が可能である。

本装置は、有機EL (ElectroLuminescence) ディスプレイおよび各種デバイスの成膜装置として多くの需要が期待されている。

主要仕様

型式	下面成膜型 シャトル搬送式
基板サイズ	370(W)×470(L) mm (1 ガン) 730(W)×920(L) mm (2 ガン)
成膜材料	タブレット成形ITO SiO
成膜温度	80 以下 (非加熱成膜) 可能
アライメント精度	±50 μm 以下可能

特 長

成膜室とクラスタ室の間にバッファ室を設置しており、成膜室を独立に制御することが可能である。

マスクを適用した成膜が可能である。

基板とマスクのアライメントは、CCDカメラとステージの組み合わせで短時間で高い精度が可能である。

シャトル走行による移動成膜で、均一な膜厚・膜質分布を実現している。

材料供給装置により、長時間運転可能である。

搬送ロボットでマスクトレイもハンドリング可能である。

(量子機器事業部 山本 敏隆)

液晶製造装置用大型汎用ステージ

Linear Guided Gantry Moving Type of Large Stage for FPD



液晶市場は、パソコンからテレビへと拡大してきている。これにより液晶製造のガラス基板も年々大きくなってきており、現状の最大サイズは、第8世代と呼ばれるもので、ガラス基板サイズは全長2m以上となる。ガラス基板が急激に大きくなったことにより、液晶製造装置の「歩留まりの低下」が大きな課題となってきた。エンドユーザは、歩留まりの低下の防止に、液晶製造ラインに今まで以上の数の検査装置およびピエゾ装置をラインに配置するようになった。検査装置およびピエゾ装置に採用されているステージの特徴は、露光装置などの他の用途と比べると、精度より軽量・低価格であることが重視される。

そこで、当社は製缶構造ステージを開発し、「GLシリーズ」(Gantry Linear motor guide)として昨年より販売を開始した。本報では、昨年より既に30台の販売実績を持つ第7世代用ステージGL2000を紹介する。

主要仕様

	上軸	下軸
有効ストローク	2175 mm	2395 mm
最高速度	1400 mm/s	1400 mm/s
最大加速度	最大0.28 G	0.28 G (台形加速)
測長分解能	0.5 μm	0.5 μm

搭載負荷	100 kg
ステージ重量	4200 kg以下

特長

液晶製造装置向けに開発された製缶構造ガントリ移動型XYステージであり、その基本構成を次に示す。

ガイド方式	転がり案内
駆動方式	リニアモータ(コア付き/コアレス両方に対応可)
計測方式	リニアスケール(分解能0.05~1 μm)
架台	パッシブ除振台(リジッド架台にも対応)
基本構造部	溶接構造

ガントリ部およびベース部はコンパクトなサイズにまとめられ、フットプリントが小さい。

従来のボールネジ移動型ステージと比較し、急加減速および高速度移動が可能で、位置決め時間の短縮を実現した。

石定盤ベースのステージと比較し、ベース形状の自由度があり、多様な装置に対応できる。また、同時に装置の軽量化も実現した。

(住友重機械メカトロニクス株式会社 池田 弘志)

圧縮成形装置 SY-COMPの開発

Development of Compression Molding Machine SY-COMP

福岡 大* 深山 寿秀*
Yutaka FUKUOKA Toshihide MIYAMA



図1 圧縮成形装置 SY-COMP
Compression molding machine SY-COMP

昨今の携帯電子機器に代表される高密度なシステムを実現するべく、半導体パッケージ自体を高密度化するSiP (System in Package) が出現して久しい。既に、半導体チップとスペーサを合わせ5～9段積層した半導体製品が電子機器に搭載され市場に出ている。これら内部構造が複雑化したSiPの中には、従来の成形方法では良好な成形が不可能なものもあり、圧縮成形法が注目を集めている。樹脂流動が少なく、狭部への充填性に優れている圧縮成形は、SiPを成形する上で有利な特徴を有するとともに、廃材をほとんど出さない環境配慮型の成形プロセスである。

本報では、従来のモールド法に対する技術的な優位性と、これを実現した装置SY-COMPについて報告する。

Many years have passed since SiP (System in Package) was developed in order to materialize high-density system as typified by present-day mobile electric devices. We can already see in the market the electric devices, which have 5 to 9 stacked chips. As such SiPs are too complicated to keep good molding in many cases, the compression molding is grabbing people's attention in these years. The compression molding, which has less resin flow and has great advantage for filling resin to narrow space, is not only advantageous for molding SiP but also environmentally friendly as it does waste few materials. This report describes the technical advantages of the compression molding process over the conventional molding method, and the SY-COMP system, which has enabled the compression molding process to be achieved.

1 まえがき

3次元実装の主力をなすチップ積層型のSiP (System in Package) は、ここ数年で1パッケージ内のチップ積層数が急増している。多種のチップを混載することから、当初のように大チップ上に小チップが載るばかりでなく、この関係が逆転する層もあり、複雑な形状に対する樹脂の充填性が求められる。チップ積層数の増加により長ループおよび段差ボンディングなどループ形状は複雑化しており、ボンディングパッドピッチも40～50μmまで狭ピッチ化され、使用するワイヤ径も細線化傾向にある。したがって、これまで以上に

樹脂封止時の変形に対するリスクは増加している。

これらの問題に対する解決策として、当社は圧縮成形プロセスに対応したSY-COMPを開発した(図1)。

2 圧縮成形とは

一般に半導体は熱硬化樹脂を用いて、トランスファ成形法により樹脂封止されている。樹脂を金型内のポットに投入し、ランナおよびゲートを介して成形体を成すキャビティに注入される。ランナおよびゲートは成形後に除去され、廃棄物となる。これに対し、圧縮成形は直接キャビティに樹脂を投入し、厚み方向に押しつけて平板状に成形する。ランナおよび

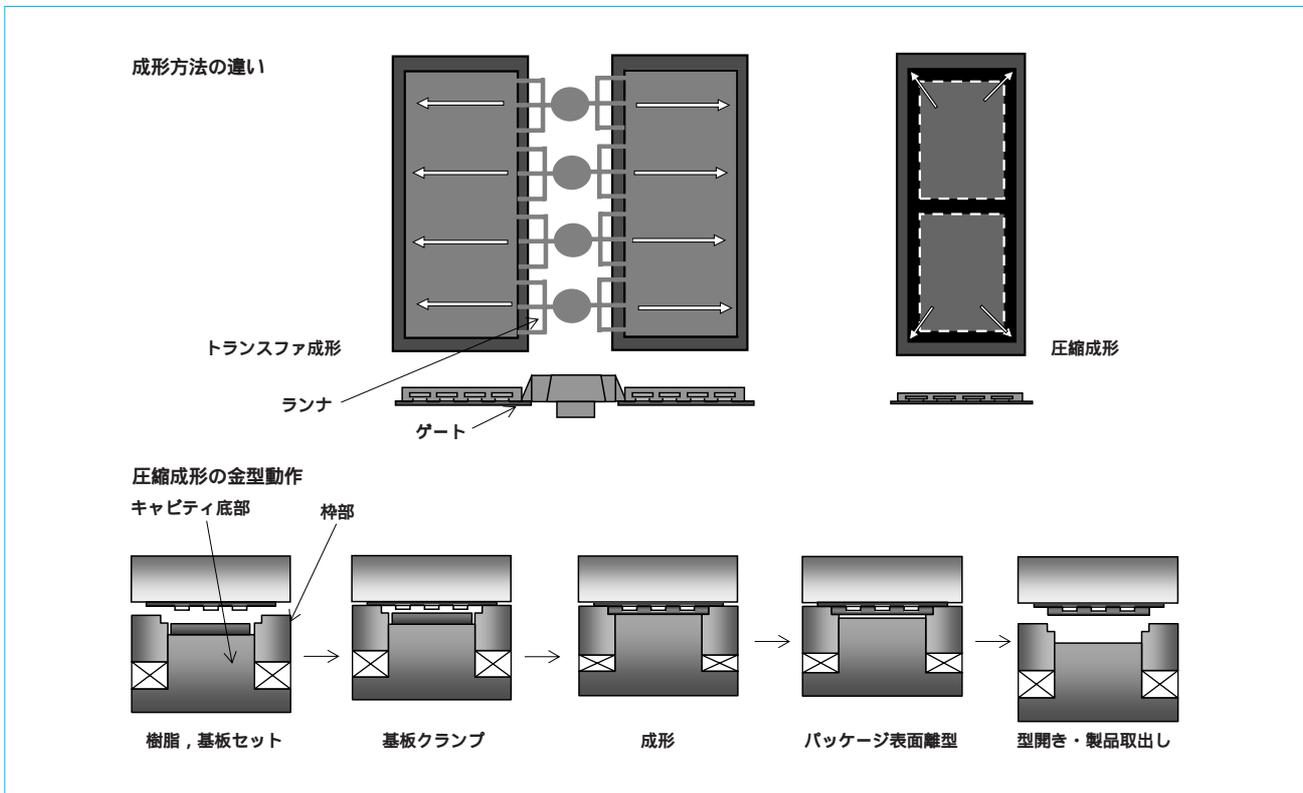


図2 成形方法
Molding processes

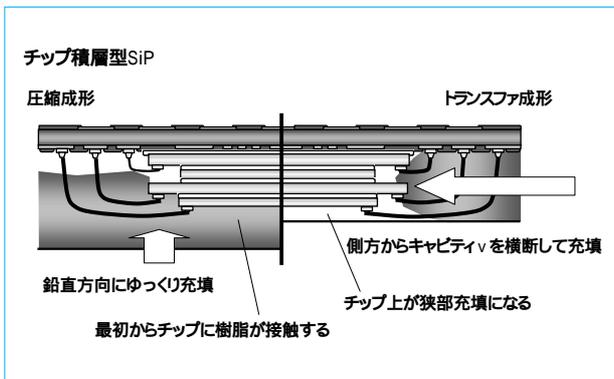


図3 樹脂流動方向の差異
Difference of resin flow direction

ゲートなどの余分な流路がなく、流動距離も極めて短いことから、流動速度を遅くできる。しかし、樹脂は従来のように金型内の流動中に受熱されず、金型上で1面から加熱されるのみで、粘度の安定から見た場合不利となる。また、構造上、上下金型同士を当接しないことから、成形品の厚さ方向の精度は金型以外にプレス精度および樹脂投入量精度により決定される。厚さに不安定さがある反面、従来のように金型の交換によるのではなく、投入樹脂量を変えるだけでパッケージ厚さを可変できるメリットがある(図2、図3)。

圧縮成形の特徴および重点ポイントを次にまとめる。

- ランナおよびゲートがない。
- 流動長が極めて短い。
- 樹脂の受熱状態が重要である。
- プレスの平行度精度が重要である。

樹脂投入量精度が重要である。

3 圧縮成形の技術的優位性

3.1 長ワイヤ封止

圧縮成形では、基板面に向かい樹脂を押し付けて行く成形であることから、隣接ワイヤ方向(横方向)への変形を生じにくい。その反面、圧縮方向(縦方向)にワイヤを変形させる力が生じる。

ワイヤは流路内にある円柱状の抵抗体であり、単位長さあたりの抗力 w は以下ようになる。抗力係数 C_D は、モールド樹脂レベルの粘度と流速からするとレイノルズ数 Re が極めて小さい。この領域では、Lambの式を適用する。

$$w = Dv^2C_D / 2$$

$$C_D = 8 / (Re \cdot \ln(7.4/Re))$$

$$Re = vD / \mu$$

：流体密度 D ：ワイヤ径 v ：流速 C_D ：抗力係数
：粘度

成形プロセスから制御できるパラメータは、温度および流速の2点である。樹脂の粘度は温度と速度に依存するが、温度に関しては圧縮成形とトランスファでの差はない。また速度に依存(チクソ性)する粘度変化は、温度ほどの影響はなく、ワイヤ変形に直結するのは流速の制御である。

圧縮成形は、トランスファ成形とは比較にならないほどの低速度域で、ワイヤ周囲を樹脂が流動する。ワイヤ抗力 w を流速および粘度から試算すると、トランスファ成形の流速域に比べて圧縮成形の流速域の抗力が明らかに小さい。さらに

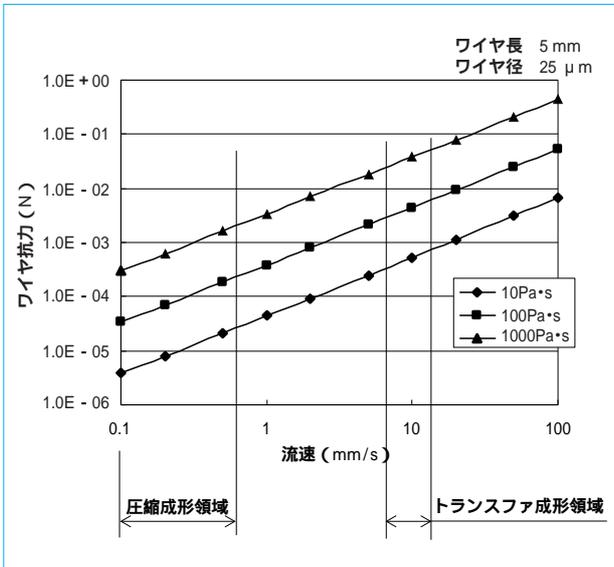


図4 ワイヤ抗力 Wire drag

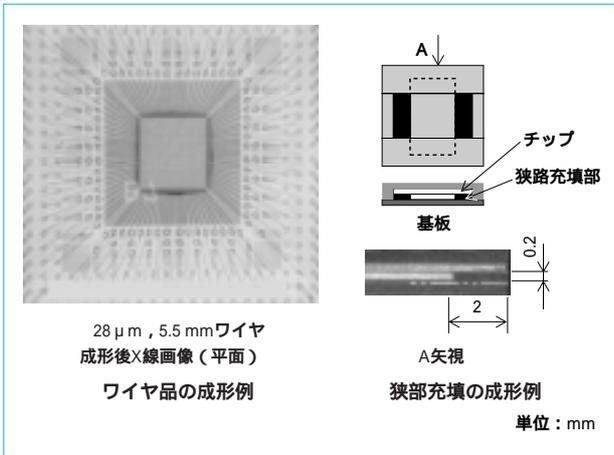


図5 成形例 Molding package sample

僅かであるが、粘度より流速に対して感度が高いことが分かる(図4)。したがって、極低速で成形する圧縮成形は、ワイヤ変形に対しトランスファ成形より有利と言える(図5、図5)。

3.2 狭部充填

チップ積層数の増加により、パッケージ上面からチップ上面までの距離を縮小する要求が増えている。また、下段チップより上段チップが張り出した状態のものも少なくない。これらの狭部に樹脂を充填するには、圧力損失 p 加圧力 p の関係になくてはならない。チップ面と金型面などの2平面間を移動する粘性流体の圧力損失は、次式に従う。

$$p = 12 \mu v x / h^2 \quad (\text{側壁抵抗は無視})$$

p : 圧力損失 μ : 粘度 v : 流速 x : 流動長
 h : 2平面間の距離

式より2平面間の距離 h の2乗に反比例するので、チップ上面と金型面との隙間が狭くなると、圧力損失が大きくなり、

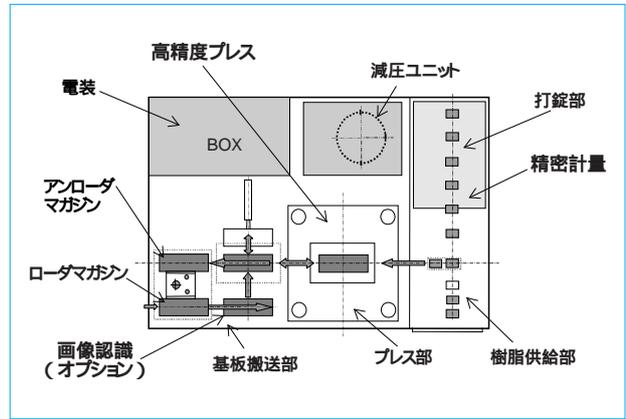


図6 装置レイアウト Equipment layout

樹脂の流動が遅れ、未充填などの成形不良を招く。この問題に対し、圧縮成形の場合該当部(チップ面と金型面の隙間)から樹脂が接するので、狭部への充填という形にはならない。

またチップ間充填の場合、トランスファ成型および圧縮成形を問わず、チップ間への充填が進行するのは、キャビティに樹脂がほぼ行き渡り、圧力が上昇を始めてからである。充填の最終段階であり、見かけの樹脂流動はほぼ停止していることから、キャビティ内の樹脂は急激に粘度上昇する。トランスファ成形では、この状態の樹脂をランナおよびゲートを介して加圧し、狭部への充填を進行させる必要がある。圧縮成形では、ランナおよびゲートがなく流動長 x が短いことから、充填部までの圧力損失がほとんどない。狭部入口の樹脂圧力が高い分、狭部進行中に起こる圧力損失に対し余裕がある(図5)。図の下の写真は、半導体チップを2段積層したものを圧縮成形で封止した断面である。基板と2段目のチップに挟まれた領域に、樹脂が充填されていることを示す。

4 プリフォーム樹脂

当社の圧縮成型装置は、粉粒樹脂から一度キャビティサイズより僅かに小さいプレート状樹脂に予備成形(プリフォーム)している。

プリフォームによる効果は、以下の点にある。

- 受熱効率
- 平面的な均一性
- 成形部および搬送系の粉塵汚染防止

受熱効率については、パッケージの厚さと関係する。原料である粉粒樹脂をキャビティに均一に分布させても、おおむねパッケージ厚さの倍となる。この状態で金型面から受熱すると、金型に接している樹脂と上面の樹脂では温度差が大きくなり、ある程度の厚さになると成形性を損なうことになる。

プリフォームには、加熱成形法を用いている。どのタイプの樹脂でも軟化点があり、プリフォームに必要な成形圧力が急激に低下する。この点を利用し、大型のキャビティに対応するプレート状樹脂であっても、数kNでプリフォームを可能にしている。

加熱成形後の樹脂のスパイラルフローおよび粘度など、樹脂特性に変化がないことは確認済みである。

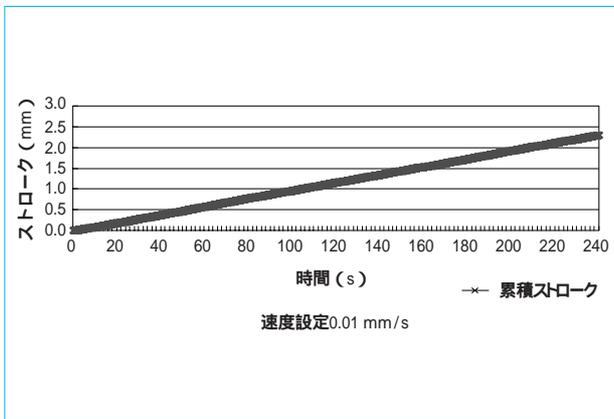


図7 プレス速度精度
Accuracy of press velocity

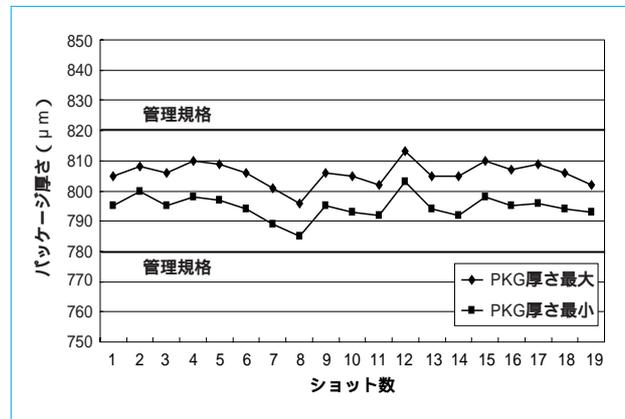


図8 パッケージ厚さ精度
Actual data of package thickness

5 装置特性

5.1 プレス

圧縮成形では、従来のように上下の金型が当接して金型間の平行度が決まる構造ではなく、基板に対して樹脂を押し込んで成形することから、基板面と金型との平行度がそのまま成形品の平行度となる。つまり金型自身の平行度と、プレス機の平行度を合わせた精度が成形品の平行度となる。半導体パッケージの外形精度は ± 0.05 mm以下が規格であるが、モールド工程の管理規格としては ± 0.02 mm以下が要求される。圧縮成形においても、これと同程度の精度を実現する必要がある。

従来のトグル構造のプレスでは、この精度を実現できないことから、動平行度を高精度に保つ圧縮成形用プレスを開発した(図6)。

可動プラテンが高精度にガイドされ、ボールネジにより直接駆動することから、平行度を高精度に維持したまま、速度および出力をリニアに制御できる。前述のようにワイヤ変形は樹脂の流動速度に大きく依存することから、速度制御性も重要な要素である。低速域 0.01 mm/sでのリニアリティを測定した結果を、図7に示す。通常使用する最低速度は 0.1 mm/sであるので、十分な低速性能を得られた。

5.2 樹脂供給システム

平行度と同様に、圧縮成形では成形品の厚さは金型で決定されない。金型内に投入する樹脂量と、成形体の内蔵物(半導体チップ)の体積により決定される。パッケージ厚さを一定に保つには、半導体チップの体積(数)を把握し、必要な成形品厚さにする樹脂量を算出して計量し、金型に投入する必要がある。

圧縮成形装置では、画像認識により基板上の半導体チップ搭載数を把握し、そのデータに基づいて樹脂重量を算出し、計量した樹脂を供給してプリフォームする。プリフォームの形状は、キャピティサイズに近いプレート状としている。プリフォーム後の樹脂は金型に投入する前に、再度計量して所望の重量であることを確認する。この時点で不慮による欠損などあれば破棄し、必要な樹脂を再度計量、プリフォームする。このシステムにより、成形品厚さのパラツキを ± 0.02 mm以下に押えることができた(図8)。

6 むすび

本報では、圧縮成形法の優位性と、これを実現した装置SY・COMPについて報告した。

樹脂の流動速度から、ワイヤ変形に対し有利である。樹脂の流動方向から、特に半導体チップ上の狭部充填に有利である。

圧縮成形を実現するプレスを開発し、性能を確認した。装置システムとして、成形品の厚さ精度を確保できた。

(参考文献)

- Robert L. Daugherty, Joseph B. Franzini and E. John Finemore . FLUID MECHANICS with Engineering Applications. McGraw-Hill Book Company, p.188-189, p.295-297, p.318, 1985.
- G.K.Batchelor. AN INTRODUCTION TO FLUID DYNAMICS . Cambridge University Press, p.244-246, 2001.

新型半導体モールド装置 SXシリーズ

New Molding Machine SX Series

澤田 博行* 曾根 正 明* 嶋崎 重 昭* 川野 勉*
 Hiroyuki SAWADA Masaaki SONE Shigeaki SHIMASAKI Tsutomu KAWANO



図1 新型モールド装置 SX120 (4 プレス)
 New molding machine SX120(4presses)

1 はじめに

半導体モールド装置はワイヤボンディングされた半導体を樹脂封止する装置であり、材料供給 成形 金型クリーニング ゲートブレイク 収納を全自動で行う。最近では、生産量に応じてプレス数を選択できるモジュラタイプが主流になってきている。

一方、近年半導体の製造工程においては生産性向上の目的でリードフレーム内素子のマトリックス化が進み、リードフレームの大判化が進められている。リードフレームが大判化されると封止面積が増え、従来490~785 kNで可能であったプレス型締力の増強ニーズが強まってきた。

そこで当社は、対象リードフレームサイズが大きく、型締力1176 kNのモジュラー型封止装置を開発した(図1)。この装置は同じ能力の従来装置に比べ、設置面積がコンパクトで、高速高生産かつクリーンであることが特長である。

本報では、今回開発した新型封止装置を設計面および性能面の特長を中心に解説する。

2 装置の特長

2.1 省スペース

バスライン1330 mm、プレスストローク186 mmとクリーニングなどの作業性を確保しつつ、幅580 mmのコンパクトなプレスを新規に開発した。装置としても4 プレスタイプで幅3820 mm、奥行1550 mmと設置面積を小さくしている。小型化に伴い、レイアウトのフレキシブル性およびスペース効率向上が図れる(図2、表1)

また、このコンパクトプレスの採用により、同じ能力の従来装置に比べ1~3割も軽量となっている。

プレス幅は狭く抑えているが、対象リードフレームサイズ

は85×260 mmと業界最大クラスを確保している。これは、ローダ・アンローダが金型内に進入するY軸を片持ち構造とし、プレス内のローダ・アンローダY軸用のレールを省いたことで、ダイセット幅を広くできたことによる。Y軸ガイド方式は従来主流のカムフォロアガイドから新規にリニアガイドを採用したことで、ダイセットとローダ・アンローダの位置決めによりラ式ガイドを採用することで確実な位置決め再現性を確保している。

2.2 ハイサイクル

型締力1176 kNのプレスとなるとプラテンの重量が重くなり、従来は速度も相当遅くなる傾向にあった。今回新開発したプレスはプラテンの小型化およびトグル機構とサーボモータの最適設計により、100 mm/s^{*1}の高速送りを確保している。

また、ローダ・アンローダはサーボモータの最適使用により容量を無駄に大きくすることなく、高速移動(X軸2500 mm/s、Y軸1500 mm/s)を可能とした。プレスの非成形時間(プレスへの材料の供給と製品の取出しおよびクリーン動作時間)を削減している。

これらの改善により、型締力1176 kNの4 プレスタイプとしては業界最速のマシンタイム17 秒^{*2}を実現し、時間あたりの生産量としては374フレーム/時間のハイサイクルを実現した。

*1 速度はボールネジ速度。

*2 4 プレス機において下記条件のとき。

成形時間(注入+キュアタイム)+マシンタイム=77 s以下である。

特殊なプロセス条件(減圧成形および型上プリヒート)を必要とする場合は、そのプロセス時間を含めたサイクルタイムが77 秒以下である。

過大なプリヒート時間およびエアブロー時間は除く。

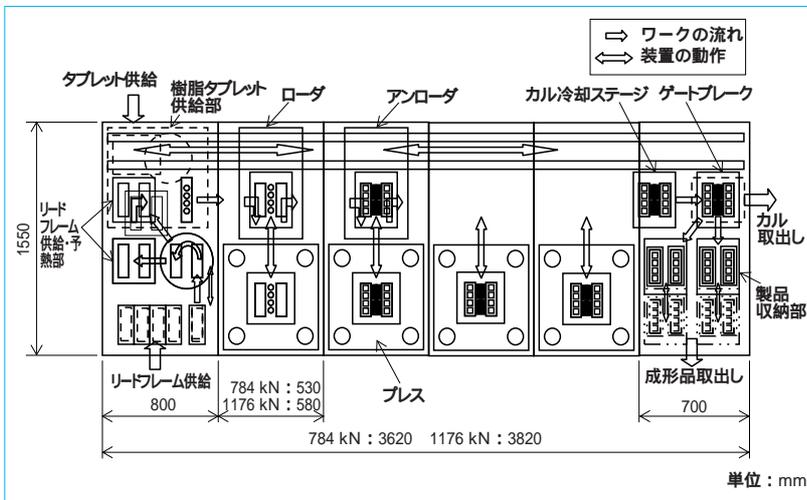


図2 概略構成
Outline composition

表1 主要仕様
Major specifications

MODEL	SX120A - 4P
リードフレーム取り数	8 フレーム / 4 プレス
リードフレーム幅 (mm)	14 ~ 85
リードフレーム長さ (mm)	140 ~ 260
タブレット径 (mm)	11 ~ 20
タブレット長さ (mm)	タブレット径 (×1.1 ~ ×1.8) (最大34)
マシンタイム (s)	17 (標準仕様時)
サイクルタイム (s)	最小77
型締力 (kN)	1176
型締ストローク (mm)	186.5
トランスファ力 (kN)	47
装置外形寸法 (mm)	3820 (W) × 1550 (D) × 1950 (H)
パスライン (mm)	1330

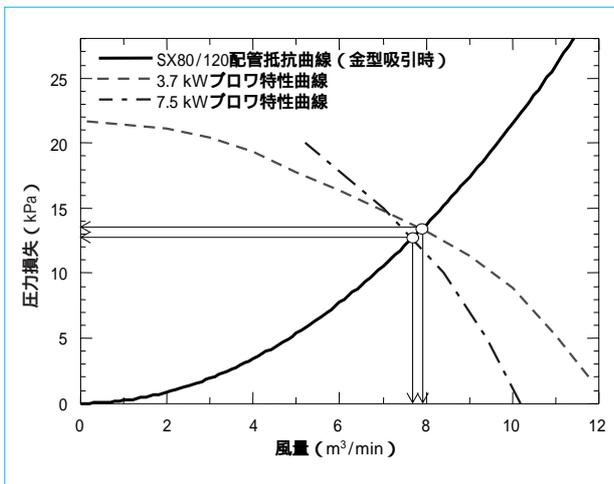


図3 クリーナ特性
Characteristics of cleaner

2.3 クリーン性の確保

モールド装置は、クリーンエリアと粉塵発生エリアが共存した装置である。リードフレーム供給と成形前の金型はクリーンに保たなければならないが、一方樹脂タブレット供給では樹脂粉が、成形後の金型から製品収納までは成形後の樹脂バリが発生してしまう環境にある。1 台の装置の中で両者を如何に区別するかがモールド装置の良し悪しを決めるといっても過言ではなく、SX120ではこの区別に下記工夫を施している。

2.3.1 クリーナ吸引力の確保と省エネルギー

吸引口形状および配管経路を工夫し、3.7 kWプロア特性を有効に使用することにより、従来の7.5 kWプロアより優れた吸引力(風量)を発揮する(図3)。また、プロア制御にインバータを用いクリーニング時以外は回転数を落とすことにより、省エネルギーにも貢献している。

2.3.2 タブレット供給室の完全密閉

タブレット供給室を完全密閉とし、ローダへの樹脂受渡し時にのみ小扉が開閉しタブレットの受渡しをする。

2.3.3 タブレットホルダの清掃

タブレットの樹脂粉を撒き散らさないこともクリーンを維

持する大切なポイントで、SX120では樹脂供給室のタブレットリフトホルダと金型までタブレットを搬送するローダタブレットホルダの両方でホルダ表面を清掃するクリーナを設けている。

2.3.4 ローダにもクリーナ搭載

金型クリーナは通常アンローダが成形品を取り出した後にアンローダが行うが、SX120ではローダ先端にもクリーナを設け、ローダが金型進入時にも吸引清掃する。

3 SX120のシリーズ展開

SXシリーズは、下記 3 タイプとプレス能力 2 種から構成される。本報で報告したSX120はAタイプで、残りの 2 タイプを開発中である。B、Cタイプが完成すれば、IN側モジュールやプレスの共通部を仕込み生産することにより、短納期に対応することも可能となる。

- Aタイプ スタックマガジン収納(リードフレーム用)
- Bタイプ スリットマガジン収納(サブストレート用)
(開発中)
- Cタイプ ランナ、タイバーおよびバリカットプレス
付きスタックマガジン収納(開発中)

なお、各プレスの型締力は784 kN/1176 kNである。

4 おわりに

当社では、これまで培ってきたモルディング技術の集大成として、型締力1176 kNのモジュラー型封止装置 SX120を開発した。

SX120の特長を次に示す。

- a. 対象リードフレームサイズが大きい。
- b. 省スペースである。
- c. 高速高生産を実現している。
- d. クリーンである。

今後は残りの 2 タイプの完成を急ぐとともに、更なる技術革新を進め、多様なニーズに対応していく所存である。

衛星搭載クライオスタットの軌道上実績

Results on Orbit of Cryostat Equipped for Satellite

恒松正二* 平林誠之* 吉田誠至*
Shoji TSUNEMATSU Masayuki HIRABAYASHI Seiji YOSHIDA



図1

SFU搭載IRTS用クライオスタット(左)および「あかり」用クライオスタット(右)
Cryostat (Left) for IRTS equipped with SFU and cryostat (Right) for AKARI

1 はじめに

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency JAXA) を始めとした客先とともに開発し、打上げ、宇宙空間にて運用されてきた当社の宇宙機器の中で、天文衛星用クライオスタット(極低温冷却システム)に関するシステム概要、構造、特徴および軌道上性能などについて紹介する。

2 SFU搭載IRTS用クライオスタット

本クライオスタットを搭載した宇宙赤外線望遠鏡IRTS (InfraRed Telescope in Space) は単独の衛星ではなく、多目的の宇宙実験用プラットフォームである回収型人工衛星宇宙実験・観測フリーフライヤSFU (Space Flyer Unit) に搭載され、赤外線天体観測用としては日本で初めて地球を回る軌道に投入された(図1)。

高感度の赤外線観測を可能にするべく、タンク内の超流動ヘリウム(He)で光学系を冷却し、光学系自身からの赤外放射を最小化するとともに、赤外線検出部を2K以下の温度に冷却してセンサ感度を向上させている。

小型・軽量を要求されるクライオスタットは、要求性能を満足するべく、以下の構造を採用している(図2)。

Heを用いた開放型冷却方式(タンク容量100L)

蒸気冷却放射シールド板VCS (Vapor Cooled Shields)

ポラスプラグによるHe気液分離

サポートストラップによる吊り構造

多層断熱材MLI (Multi-Layer Insulation) による真空断熱

クライオスタットは、アウトシェル内を真空とし、3層のVCSとMLIによりHeタンクへの侵入熱を低減している。タンクへの侵入熱はHeの蒸発潜熱として奪われ、Heは気化され、各VCSはフォアパッフル冷却後の蒸発Heガスの顕熱により冷却される。宇宙空間という無重量状態で、蒸発Heガスのみを選択的に排気する方法として、Heの熱機械

効果(温度の低い方から高い方へ流れる)を利用しており、多孔質体のポラスプラグがこの気液分離器として機能している。この開放型冷却方式とVCSの組み合わせにより、系内温度が上昇しHe蒸発量が増加した場合、VCSが冷却され、系内温度は下がる方向になるといった「温度自己制御能力」を実現している。

また、Heタンク、光学系および検出器からなる内部構造は、アウトシェルからサポートストラップによって吊り下げ、伝導伝熱による熱侵入を低減している。サポートストラップは、侵入熱を低減するとともに、打上げ時の機械環境(振動および衝撃)に耐える高強度・高剛性が必要であり、IRTS用に開発したものである。

以上の基本構造は、IRTS以降のクライオスタットでも改良が加えられ採用されている。

IRTSは、1995年3月18日にJAXA種子島宇宙センターからH-3号機により打ち上げられ、Heが枯渇した4月26日までの間に、全天の7%にもわたる領域を今までにない高感度でのサーベイ観測に成功した。IRTSは、観測終了後スペースシャトルエンデバーにより回収され、翌1996年1月20日にケネディ宇宙センターに帰還した。(現在は、独立行政法人東京国立博物館に展示されている)

3 「あかり」用クライオスタット

「あかり」は、我が国初の単独の大型赤外線望遠鏡衛星であり、欧米の宇宙赤外線望遠鏡計画に比べて軽量でありながら、世界最高の集光力、分解能および検出感度を有し、赤外線観測により、銀河の形成と進化過程、星や惑星の形成過程を探ることを主目的にしている(図1)。

クライオスタットに内蔵した望遠鏡と赤外線検出器は、望遠鏡自身が放射する赤外線の低減および検出器の暗電流の低減を目的とし、1.7KのHeからの伝導とその蒸発ガス顕熱を利用することにより、6K以下の極低温に冷却される(図3、図4)。

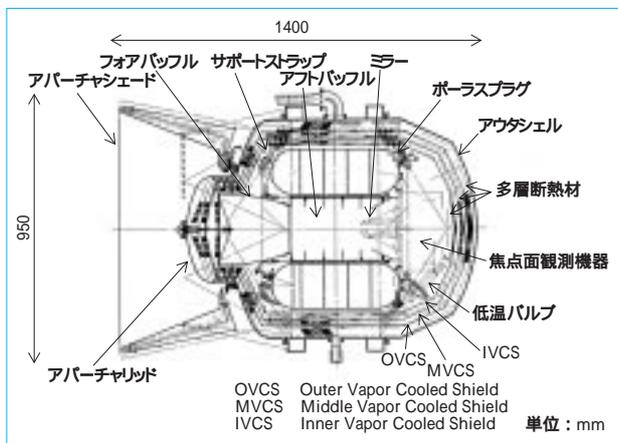


図2 IRTS用クライオスタット
Cryostat for IRTS



図3 「あかり」クライオスタット
Cryostat for AKARI

波長 2 μm ~ 200 μm の赤外線サーベイ観測を行う望遠鏡システムは、有効径67 cmのSiC製主鏡を持つリッチクレチアン方式で、副鏡を移動し焦点距離を調整する機能を有する。

衛星は太陽同期極軌道に打ち上げられ、通常は観測口からの軌道入熱を避けるべく、常に衛星側面が太陽方向、衛星底部が地球方向を向くよう姿勢制御される。全天一様サーベイ観測は超流動ヘリウム冷却により1年以上継続され、超流動ヘリウム消費後は、機械式冷凍機のみを用いて波長5 μm以下の天体観測を継続する。

「あかり」では、限られた打上げ能力の下で可能な限り大口径の望遠鏡を搭載するべく、従来の蒸発ヘリウムガスの顕熱利用に加え、補助冷却手段として2台の2段スターリング冷凍機を搭載するハイブリッドシステムとし、衛星の軽量化および高効率（従来の方式に比べ、1.5~10倍の寒剤消費効率）を実現している。

また、冷却システム性能向上を図るべく、クライオスタット外壁温度を以下の方法により200 Kレベルまで冷却した。

最大の入熱源である太陽光線は、サンシールドで防いでいる。

サンシールド自身を放射冷却し温度を下げるべく、その表面には太陽光吸収率が小さく赤外線放射率が高い熱制御材を施工している。

外壁表面に熱制御材を貼ることにより、外壁面全体を深宇宙に対する放射冷却用のラジエータとして利用している。

冷凍機冷却効率向上を図るべく、冷凍機高温部を冷却している。

「あかり」は、2006年2月22日にM-V-8型ロケットに

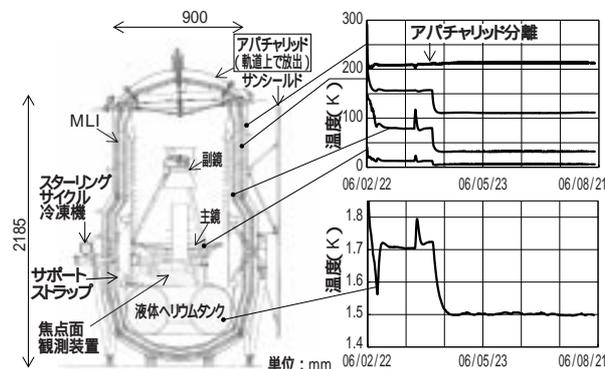


図4 「あかり」用クライオスタットの軌道上温度履歴
Temperature histories on cryostat orbit for AKARI

表1 今後のクライオスタット搭載ミッション
Mission equipped with cryostat in future

	名称	打上げ予定	打上げ機	冷却対象
1	SELENE GRS	2008年度	H-A	線検出器
2	JEM /SMILES	2008年度	HTV	サブミリ波検出器
3	VSOP-2	2010年代初頭	未定	サブミリ波検出器
4	NeXT	2010年代初頭	未定	X線検出器
5	SPICA	2010年代半	H-A	赤外線検出器

SELENE and ENgineering Explorer
Gamma-Ray Spectrometer
Japan Experiment Module
Superconducting subMillimeter-wave Limb-Emission Sounder
VLBI (Very Long Baseline Interferometry) Space Observatory Programme
New X-ray Telescope
SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics

より打ち上げられた後、現在まで順調に運用を継続している。打上げ230秒後にヘリウム排気バルブ開放、約1日後に冷凍機の駆動が開始された。打上げ51日後に実施されたアパチャリッド分離後に観測が開始され、現在まで順調に運用されている。

He枯渇時期は、軌道上でのHe液量計測により2007年8月頃と推測されている。(図4に、軌道上での各部温度履歴を示す)

今後の計画としては、表1に記載のミッションにおいて衛星搭載クライオスタットの打上げが予定されている。

4 おわりに

現在までにIRTS用および「あかり」用のクライオスタットが軌道上に打ち上げられ、「あかり」は現在も順調に運用を継続している。

これらの実績は現在開発中である各種低温冷却システムに反映され、さらに改良が重ねられている。

上記クライオスタットの開発にあたっては、JAXA宇宙科学研究本部ならびに日本電気株式会社の指導を得た。関係各位に厚く感謝の意を表す。

(参考文献)

平林誠之, 恒松正二, 佐光利幸, 青木薫. IRTS (宇宙赤外線望遠鏡) クライオスタットの熱設計と熱評価試験. 友友重機械技報, vol. 39, no. 115, p.64~71, 1991.

平林誠之, 吉田誠至, 村上浩, 中川貴雄, 大西晃, 村上正秀. 赤外線天文衛星ASTRO-F冷却システムの開発. 熱物性, vol.17, no.3, p.236~242, 2003.

下水発生汚泥量抑制プロセス

Low Excess-sludge Production Process in Sewage Treatment

淵 脇 賢二郎*
Kenjiro FUCHIWAKI

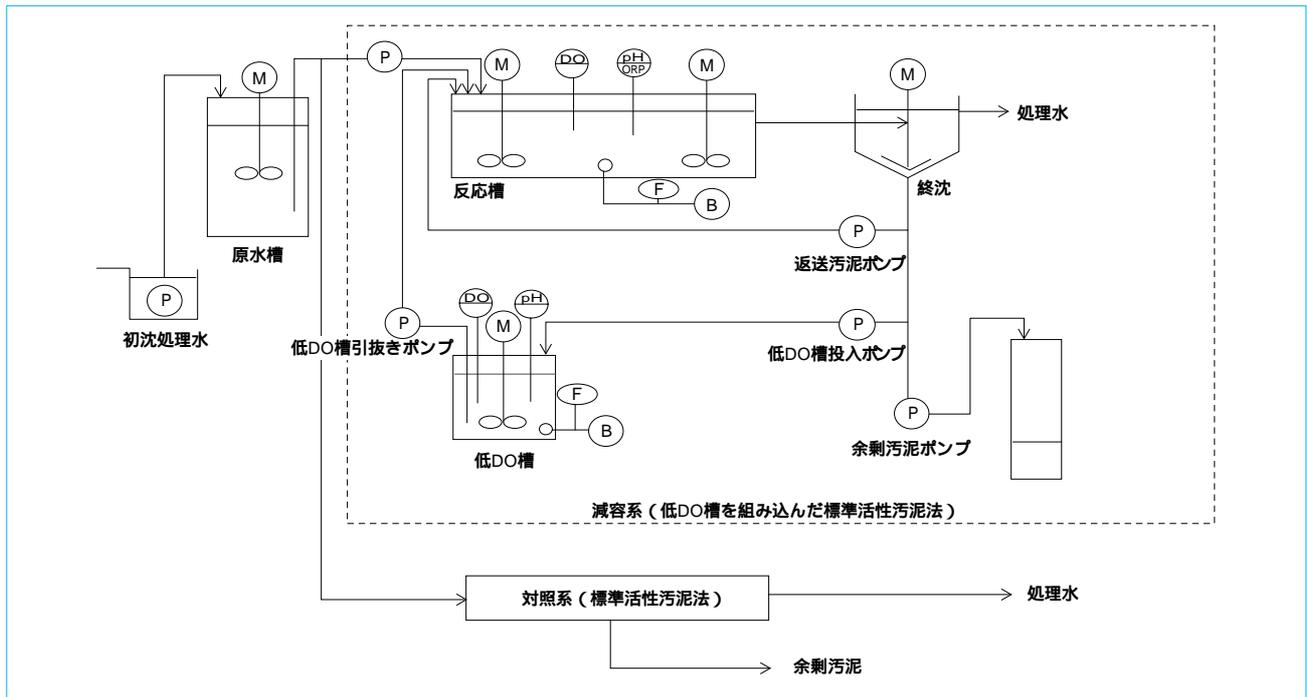


図1 テストフロー
Schematic diagram of experimental apparatus

1 はじめに

下水道整備の進展に伴い、生活環境の向上や公共水域の水質改善などの成果が着実に現れてきている。それに伴う下水処理量の増大あるいは高度処理により、水処理から発生する汚泥量も確実に増加している。

通常、下水汚泥は水分のほか肥効性のある有機物を多く含み、石炭に近い発熱量を有する有用な資源である。したがって、汚泥は緑農地利用やエネルギー利用などの有効利用を行うことが最も望ましい処理形態である。

しかし、経済活動の高度化による廃棄物排出量の増大、廃棄物最終処分場の新規立地の困難さから最終処分量を抑制し、かつ処理場運営費に占める汚泥処分費の低減を図るべく、効果的な汚泥減容化技術が求められている。

汚泥減容化技術を大別すると、以下の三つの方式がある。

好気性消化および嫌気性消化など、生物学的に汚泥を減少させる。

機械的破碎、熱処理およびオゾン酸化など、物理化学的に汚泥を減少させる。

上記 および の組み合わせにより、汚泥を減少させる。

上記の技術は、いずれも一度発生した汚泥を減容する方法である。一方、今回報告するプロセスは、返送汚泥の一部を

低溶存酸素（低DO）条件で好気性消化を行い、反応槽で自己消化を促進させ、発生汚泥量そのものを抑制する水処理プロセスで、汚泥減容方法の一つと見なせる。

なお、低DO条件における好気性消化には、以下の利点があることが報告されている。

低DO消化では、硝化と脱窒が同時に進行することから、pH調整が必要ない。

低DO消化では、曝気量が少ないことから熱損失を低く抑えられ、その結果消化速度が速い。

曝気に要する電力消費量の削減に伴うランニングコストの低減が図れる。

そこで、本試験ではその発生汚泥量の抑制効果を把握することを目的とした。

2 試験方法

テスト装置の概略フローを、図1に示す。減容系は返送ラインに低DO槽を組み込んだ標準活性汚泥法で、返送汚泥の一部は低DO槽を経由して反応槽に返送する。発生汚泥量の抑制効果を評価する上での比較となる対照系には、通常の標準活性汚泥法を用い、反応槽の容量はともに30 Lで、低DO槽の容量は10 Lとした。

試験では実下水を用いて、減容系および対照系とも1日あたり90 Lの下水を処理し水質分析を行った。

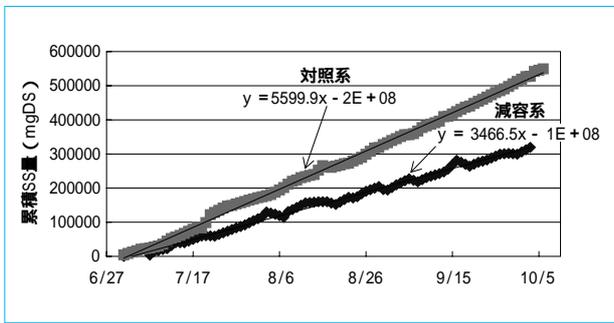


図2 累積発生汚泥量
Total amount of excess-sludge

表1 各槽のSVおよびSVI
Sludge characteristics of each reactor

		SV (vol%)	SVI (mL/g)	MLSS (mg/L)
減容系 (標準法 + 低DO槽)	反応槽	42	123	3420
	低DO槽	99	93	10667
対照系 (標準法)	反応槽	53.5	229	2340

3 試験結果

7月から9月までの累積発生汚泥量を、図2に示す。グラフの傾きが1日あたりの発生汚泥量を示す。7月から9月までの長期データで判定すると、減容系での発生汚泥量は3.5 gDS/dで、対照系での発生汚泥量は5.6 gDS/dであった。

ここで、抑制効果を次式で評価するものとする、

$$\text{抑制効果} = \frac{\text{減容系の固形物発生量}}{\text{対照系の固形物発生量}} \times 100$$

減容系の抑制効果としては、63% (= 3.5/5.6 × 100) である。したがって、対照系での発生汚泥量を100%とすると、減容系では対照系の37%に相当する汚泥量が減容されたことを見なすことができる。

また、試験開始からの流入水と処理水の分析結果の一例を、図3に示す。

処理水質は減容系および対照系とも同程度で、良好な結果が得られている。特に、発生汚泥量抑制運転による処理水の悪化は確認されなかった。

試験終了時における各槽のSV (Sludge Volume) およびSVI (Sludge Volume Index) を、表1に示す。SVIを比較すると、減容系が最も良く対照系の約半分程度であった。これは、減容系において返送汚泥の一部を、低DO槽を経由して反応槽に返送することで、汚泥の沈降性が改善されたものと考えられる。また、汚泥の沈降性が改善されたことで、系内で保持する活性汚泥量を高く維持できた。

今回の試験では低DO槽の容量を反応槽の1/3で実施し、かつMLSS (Mixed Liquor Suspended Solid) は反応槽の約3倍の濃度で運転することができた。

減容系の系内で保持する活性汚泥量 (MLSS量) は、反応槽で103 gDS (= 3.42 × 30)、低DO槽で107 gDS (= 10.7 × 10)、計210 gDSであった。一方、対照系で保持する活性汚泥量は

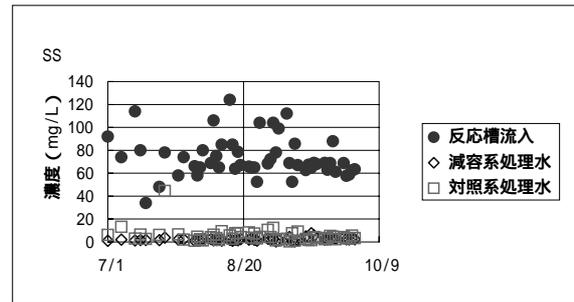
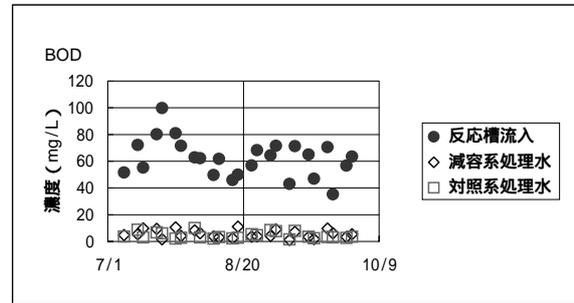


図3 水質分析結果
Influent and effluent BOD and SS concentrations

70.2 gDS (= 2.34 × 30) であった。したがって、減容系では対照系の約3倍量の活性汚泥を保持していたことになる。

一般に、下水中に含まれる有機物は活性汚泥に摂取され、酸化と同化に利用される。酸化では微生物の生体維持や細胞合成などに必要なエネルギーを得るには有機物を利用し、同化では酸化で得たエネルギーを利用して有機物を新しい細胞物質に合成する (活性汚泥の増殖) と言われている。

減容系では、対照系と比較して約3倍量の活性汚泥を系内に保持し、酸化に利用された有機物の割合が対照系より高かったことから、発生汚泥量が抑制されたものと考えられる。

4 おわりに

減容系では、対照系と比較して発生汚泥量を63%に抑制できた。すなわち、37%に相当する汚泥を減容できた。

返送汚泥の一部を低DO条件に置くことで、汚泥の沈降性が改善できることを確認した。

汚泥減容運転による処理水の悪化は確認されなかった。

(参考文献)

RaviSankar Arunachalam, Hemant K. Shah and Lu-Kwang Ju. Aerobic Sludge Digestion under Low Dissolved Oxygen Concentrations. Water Environment Research, vol. 76, no.5, p.453-462, Sept./Oct., 2004.

社団法人日本下水道協会. 下水道施設計画・設計指針と解説 後編. 2001年版. p.14 ~ 24.

アンパイリング/パイリング用リフティングマグネット装置

Lifting Magnet Device for Unpiling/Piling



本装置は、鋼板の生産工程で使用する自動・手動アンパイリング/パイリング用リフティングマグネット装置として国内の製鉄所に納入したものである。

主要仕様

マグネット

LEC-03A型

284 丸型電磁石式

DC110V 0.2 kW 50 %ED

鋼板1枚選択吊り用

4台(行)×20台(列)の配置

マグネット総台数 80台

取扱鋼板

種類 一般構造用炭素鋼

温度 -5 ~ 100

板厚 4.5 ~ 25.0 mm

板幅 1.4 ~ 4.0 m

板長 3.0 ~ 12.0 m

吊上げ荷重 最大98 kN (10 tf)

電源装置

IGBT式マグネット個別定電流制御式

停電時バックアップ機能を装備

運転操作

遠隔自動運転

(上位制御システムからの指令による運転)

吸引指令 釈放指令 励磁電流値指令

マグネット励磁区分選択指令

現場手動運転(半自動運転)

(グラフィックオペレーションターミナル操作による半自動運転)

吸引指令 釈放指令 励磁電流値指令

マグネット励磁区分選択指令

特長

任意サイズ鋼板の山積み状態の鋼板山から、最上部の鋼板1枚を自動運転で選択吊上げ可能なように、マグネットの磁気特性、取付け機構および電気制御特性を考慮している。

小径丸型マグネットにより、磁気浸透深さを浅くし薄板1枚選択性を確保した。

小径丸型マグネットを分散配置、クッションスプリングを介し個々のマグネットを独立懸架して必要特性を確保した。

a. サイズ違いの鋼板を山積みしたとき、最上部に生じる平面度の不均一(吸着面の凹凸)に対応している。

b. 荷重分担のバランス化による薄板鋼板選択性を確保した。

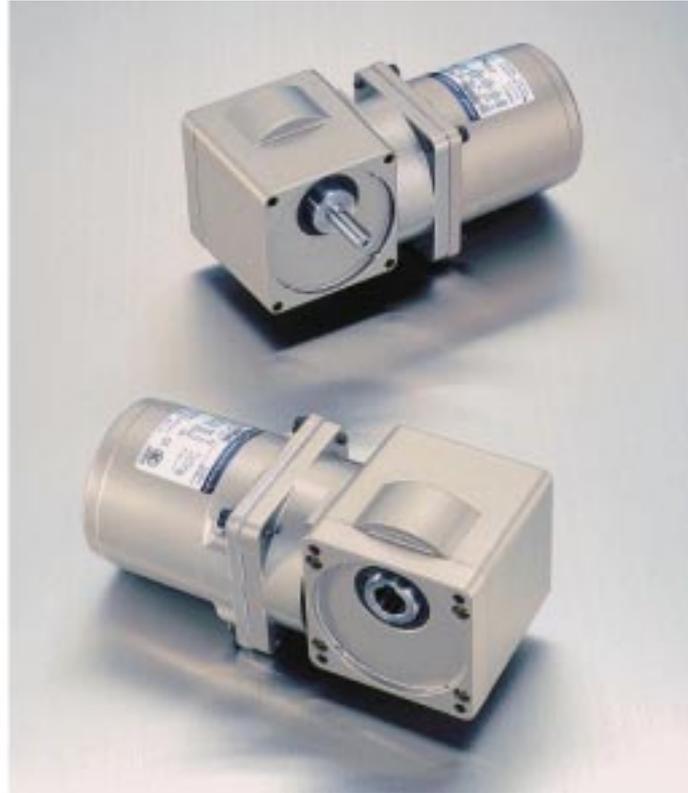
c. 荷重分担のバランス化による鋼板たわみ量の軽減および薄板鋼板の吊り安定性を確保した。

マグネットを個々に定電流制御し、最適励磁とした。

(量子機器事業部 永井 健)

アステロ 直交ギヤヘッド

ASTERO Right Angle Gear Head



0.1 kW以上の小型ギヤモータ製品では、省スペース設計が可能、メンテナンスが容易および高効率・低騒音運転が可能といった特長を持っているハイポイド方式の直交軸ギヤモータが伸びている。

一方、0.1 kW未満のギヤモータ市場では、多様なモータに対応するべく、モータとギヤヘッドが分離可能な平行軸型が主流である。よりコンパクトで低騒音なギヤモータに対する市場要求にこたえて、ハイポイド方式のアステロ 直交ギヤヘッドを開発した。

主要仕様

形式 中空、中実軸タイプ
モータ アステロ 三相 単相モータ 25～90 W
減速比 5～240

特長

アステロ モータの軸はヘリカルギヤとなっているが、ギヤヘッドの入力軸のホロー部に差し込むだけで、簡単に連結できる構造を開発した。

また、アステロ 用モータには豊富なバリエーションがあり、インダクションモータ、レバーシプルモータ、電磁ブレーキ付きモータおよびスピードコントロールモ

ータなど、様々なモータとの組み合わせが可能である。

発売済みのアステロ ギヤモータ（平行軸タイプ）と取付けに使用するフランジ寸法や軸径を合わせた設計とした。これにより、お客様の機械側の設計を変えることなく、置換えが可能となった。

また、平行軸タイプではチェーンやプーリー、それらを保護するカバーなどが必要となる場合があったが、直交軸タイプでは直接取り付けることができ、お客様の機械自体を低コストでコンパクトに構成することが可能となった。

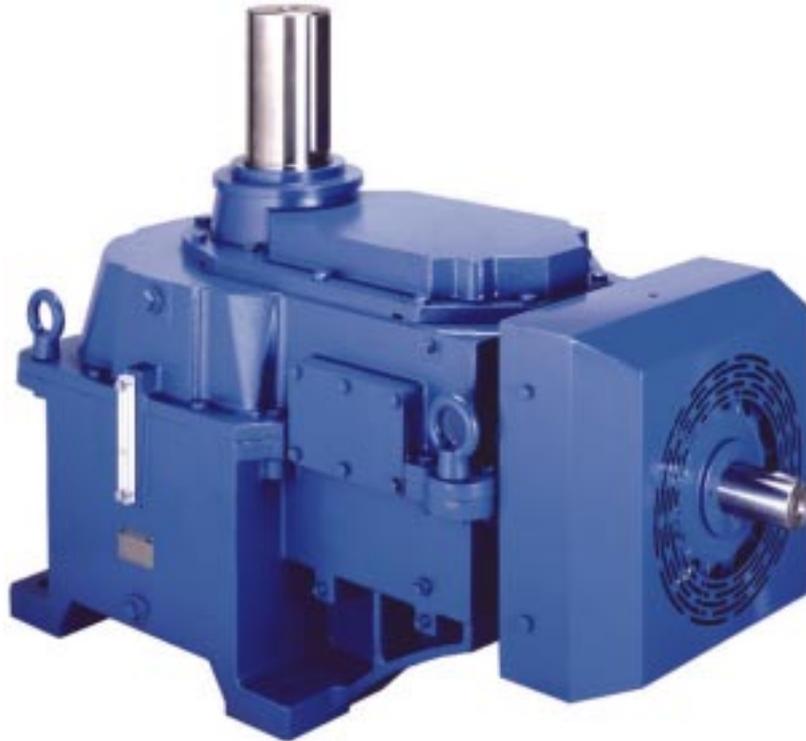
高速段にハイポイドギヤを用い、独自の解析、加工技術により、低騒音および高効率を実現している。

また、メンテナンスフリーの製品でもあり、環境負荷の低減に貢献できるギヤモータである。

(PTC事業部 竹原 敬二)

クーリングタワー用減速機 低騒音SFCシリーズ

SFC Low Noise Model for Cooling Tower Drive



クーリングタワー用のファン駆動減速機として、SFCシリーズを2001年より世界市場向けに発売している。今回、本シリーズの低騒音タイプを開発した。

SFCシリーズはクーリングタワー用専用設計機として、従来から以下のような特長を持っている。

ハウジング、軸および軸受が最適化され、剛性を強化している。

新冷却ファンを標準装備し、熱容量の向上を実現している。

枠番間のトルクの飛びが小さく、最適な選定が可能である。

ファン逆転防止機能として、バックストップを標準化している。

近年、減速機を含む装置が居住地に隣接して設置されるなど、低騒音が要求されるケースが多くなっており低騒音仕様の実現が期待されていた。しかし、クーリングタワー用減速機は設備の配置上直交減速機が使用されるが、直交減速機に用いられるベベルギヤは一般的に音が大きく、低騒音化は困難であった。

グローバルブランドとしての地位確立には、工業用減速機分野における低騒音技術の確立は必須である。特にクーリン

グタワー用減速機においては低騒音化のニーズが高く、国内市場でのシェア維持および海外市場でのマーケット拡大において低騒音化は有効なセールスポイントとなる。

今回、SFCシリーズのベベルギヤ（入力段）に3次元歯面修整を実施することで低騒音化を実現した。従来の2次元歯面修整（歯形修整および歯すじ修整）から3次元歯面修整（バイアス修整を追加）へ変更することで、噛合い長さや接触線長さを制御でき、より精密な修整が可能となった。また3次元歯面修整のツールとして次の2点の開発、導入を行った。

最適歯面修整量決定のための負荷時歯当たりシミュレーション技術を開発した。

精密な修整量の制御が可能な研削盤を導入した。

本製品は、従来機と比較し最大約7dB(A)の騒音低減することができた。

主要仕様

枠番	045～075
入力容量	55 kW～280 kW
減速比	6.3～18

(PTC事業部 大山 茂男)

油圧ショベル SH200-5 SH240-5

Hydraulic Excavator SH200-5 SH240-5



本開発は、国内排出ガス3次規制、北米EPA排出ガス規制および欧州EU排出ガス規制に適合した中型油圧ショベル20 t、24 t級を、「SH200-5型」「SH240-5型」としてフルモデルチェンジして発売するものである。

このフルモデルチェンジ機は、全世界に向けて供給する戦略主力機種であり、世界中の顧客要望を集め開発の随所に反映した。開発にあたり「運動性能」、「経済性能」および「快適性能」という三つの性能について徹底的にこだわり、「SPACE5（スペース5）」というエンジンシステムと「SIH：S（シーズ）」という油圧システムを開発・融合することで、大作業量の発揮と燃費の従来機比20%改善を実現した。

主要仕様

機種名	SH200-5	SH240-5
バケット容量	0.8 m ³	1.10 m ³
運転質量	19950 kg	24300 kg
定格出力	117.3 kW/1800 min ⁻¹	132.1 kW/2000 min ⁻¹
最大掘削半径	9900 mm	10280 mm
最大掘削深さ	6650 mm	6900 mm

特長

大作業量の実現と、それぞれ従来機比で、バケット掘削力8%アップ、走行駆動力4%アップ、バケット閉じスピード24%アップ、重掘削負荷時のスピード改善を7%実施したことで、力強い大作業量と大幅なサイクルタイムの短縮を実現した。また新たに追加したSP（Super Power）モードにより、かつてない大作業量を実現、従来機比5%の作業量アップを図った。

SPモードへの切替えは、スロットルとモード切替えを連動させた一体型スロットルポリウムにより簡単操作が可能となった。さらに、油圧回路の最適化と操作状態のセンシングにより、オペレータの力加減をスムーズに伝える高い操作性を実現した。操作レバーの投入量に応じて走行速度が変化、複合操作が必要な山間部や高い場所での作業も円滑に行える。

新エンジンシステム「スペース5」によるコモンレール超高圧燃料噴射システムとトータルの制御技術で10%の燃費改善、新油圧システム「シーズ」によるポンプ制御関係の効率改善で10%の燃費改善を実現、二つのシステムを高い次元で融合させることで従来機比20%の燃費改善を達成した。整備性としてはショベル上部に登らず地上からのメンテナンスが容易となり、清掃やパーツ交換時間の短縮が図れる。本体には管理用コントローラと通信機器を標準装備しているので、機械の状態を容易に確認でき、管理コストおよびメンテナンスコストを削減でき、幅広い情報の入手で機械のトータルマネジメントを実現している。

ワイドキャブの採用により広く大きな前方視界および右下視界を確保し、安全性能が大幅に向上した。さらに、低騒音エンジンおよび低騒音マフラの搭載に加え、遮音・吸音設計などを採用し、超低騒音を実現している。

（住友建機製造株式会社 三浦 勇）

主要営業品目

変減速機、**インバータ**

機械式減速機 : [同心軸]サイクロ減速機,サイクロギヤモータアルタックス, 精密制御用サイクロ減速機,プレストギヤモータ,コンパワー遊星歯車減速機, [平行軸]バラマックス減速機,ヘリカルパディボックス,[直交軸]バラマックス減速機,ハイボニック減速機,ベベルパディボックス,ライタックス減速機,HEDCONウォーム減速機,小形ウォーム減速機
変速機 : [機械式変速機]バイエル無段変速機, バイエル・サイクロ可変減速機,[電気式変速機]インバータ,インバータ搭載ギヤモータ,サーボドライブ,DCドライブサイクロ,アルタックス,コンパワー,バラマックス,パディボックス,ハイボニック減速機,ライタックス,HEDCON,バイエルおよびバイエル・サイクロは,住友重機械工業株式会社の登録商標です。

プラスチック加工機械

プラスチック加工機械 : 射出成形機,射出吹込成形機,ディスク成形機,セラミックス成形機
フィルム加工機 : 押出機,フィルム製造装置,ラミネート装置
IC封止プレス
ガラスプレス
成形システム・**金型** : 射出成形用金型,PETシステム,インジェクションフロー成形システム,インモールドラベリング成形システム

レーザ加工システム

レーザドリルシステム
レーザアニーリングシステム
YAGレーザと加工システム
エキシマレーザと加工システム
YAG高調波レーザと加工システム

半導体・液晶関連機器

イオン注入装置
放射光リング・AURORA,**放射光ビームライン**
成膜装置 : (液晶フラットパネル用)プラズマ薄膜形成システム
精密XYステージNanoplaneシリーズ
リニアモータ Nanoplaneシリーズ
マイクロマシン
エキシマレーザアニーリングシステム
ウエハ研削装置
ウエハ洗浄装置

AURORAおよびNanoplaneは,住友重機械工業株式会社の登録商標です。

環境施設

環境・**エネルギー**関連**プラント** : 都市ごみ焼却施設,リサイクル施設,流動層ガス化溶融炉,産業用廃棄物処理施設
大気関連**プラント** : **電気集塵装置**,**灰処理装置**,**乾式脱硫**・**脱硝装置**
水関連**プラント** : 上水処理施設,下水処理施設,浸出水処理施設
産業廃水処理装置

加速器 , **医療機器** , **精密機器** , **極低温機器** , **超電導磁石**

イオン加速器 : サイクロトロン,ライナック,シンクロトロン
電子線照射装置
医療機器 : PET診断用サイクロトロン・CYPRIS,標識化合物合成装置,がん治療用陽子サイクロトロン,治療照射装置
精密XYステージNanoplaneシリーズ
リニアモータNanoplaneシリーズ
冷凍機 : パルスチューブ冷凍機,4KGM冷凍機,スターリング冷凍機,クライオポンプ用冷凍機,MRI用冷凍機
人工衛星搭載観測装置冷却システム
超電導磁石 : ヘリウムフリー超電導マグネット

CYPRISおよびNanoplaneは,住友重機械工業株式会社の登録商標です。

事業所

本社	〒141-8686	東京都品川区北品川5丁目9番11号(住友重機械ビル)	技術開発センター	〒237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地
関西支社	〒541-0041	大阪市中央区北浜4丁目7番26号(住友ビル2号館)	技術開発センター	〒188-8585	東京都西東京市谷戸町2丁目1番1号
中部支社	〒461-0005	名古屋市東区東桜1丁目10番24号(栄大野ビル)	(田 無)		
九州支社	〒810-0801	福岡市博多区中洲5丁目6番20号(明治安田生命福岡ビル)			
田無製造所	〒188-8585	東京都西東京市谷戸町2丁目1番1号			
千葉製造所	〒263-0001	千葉市稲毛区長沼原町731番地1			
横須賀製造所	〒237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地			
名古屋製造所	〒474-8501	愛知県大府市朝日町6丁目1番地			
岡山製造所	〒713-8501	岡山県倉敷市玉島乙島新湊8230番地			
愛媛製造所					
新居浜工場	〒792-8588	愛媛県新居浜市惣開町5番2号			
西条工場	〒799-1393	愛媛県西条市今在家1501番地			

物流・**パーキングシステム**

自動倉庫システム
高速自動仕分システム
FMS/FAシステム
無人搬送システム
機械式駐車場,動く歩道

金属加工機械

鍛圧機械 : フォージングプレス,油圧プレス,フォージングロール,超高压発生装置
工作機械
SPS(放電プラズマ焼結機)

運搬荷役機械

連続式アンローダ,**港湾荷役クレーン**(**コンテナクレーン**,**タイヤマウント式ジブクレーン**,**タイヤマウント式LLC**) ,**トランスファクレーン**,**ジブクレーン**,**ゴライアスクレーン**,**天井クレーン**,**製鋼クレーン**,**自動クレーン**,**ヤード機器**(**スタッカ**,**リクレーマ**,**スタッカ/リクレーマ**) ,**シップローダ**,**ベルトコンベア**および**コンベアシステム**,**リフティングマグネット装置**

船舶海洋

船舶 : 油槽船,撒積運搬船,鉱石運搬船,鉱油兼用船,コンテナ船,自動車運搬船,LPG船,LNG船,カーフェリー,ラッシュ船,作業船,大型洋式帆船,巡視船,他
海洋構造物 : 海洋石油生産関連構造物,浮体式防災基地,浮体式海釣施設,その他海洋構造物
海洋開発機器 : 各種**ブイ**,**船用環境機器**

インフラ整備関連

橋梁 : 一般橋,長大橋
海洋・**港湾**構造物 : 沈埋函,ケーソン

化学機械 , **プラント**

一般プラント : 紙・パルプ製造装置,化学装置,原子力装置
発電設備 : 循環流動層ボイラ
圧力容器 : リアクタ,塔,槽,熱交換器
攪拌混合システム : マックスブレンダー攪拌槽,スーパーブレンダー(同心2軸型攪拌槽),バイボラック(横型2軸反応装置)

マックスブレンダーおよびバイボラックは,住友重機械工業株式会社の登録商標です。

製紙機械

抄紙機,**ワインダ**,各種製紙関連設備

建設機械,**産業車輛**

油圧式ショベル,**移動式環境保全**および**リサイクル機械**,**杭打機**,**道路舗装機械**,**フォークリフト**

その他

航空用機器,**精密鑄鍛造品**,**防衛装備品**(各種機関銃,機関砲およびシステム)

住友重機械工業株式会社の本社ビル（東京都品川区北品川5丁目9番11号）

住友重機械工業株式会社の本社ビル（