

最近の製糖プロセス計測と制御

Recent Instrumentation of Sugar Production Process

製糖プラントは古くから存在するが、そのプロセスの自動化は困難な問題が多く遅れていた。しかし、ここ数年間製造設備の近代化に伴い、その計装化も急速に進歩した。

この間筆者らも数多くの製糖プロセスの計装化に参画し、積極的に検出器、制御方式などに改善を積み重ね、多くの成果を得てきた。

本稿は、これらの技術をまとめて報告するとともに、新しい計測・制御機器である日立ユニtrolΣシリーズの適用について述べる。

大関敏之* Toshiyuki Ōzeki

石田正浩* Masahiro Ishida

1 緒 言

製糖プロセスの歴史は古く、その製品である砂糖は、我々の食生活に甘味料として大きく貢献している。しかし、その自動化には種々の難点があり、計装の近代化は遅れていた。

その主な計装上の特質として次の点が挙げられる。

(1) 制御対象が、固体、溶液、スラリー、粉体と様々に変化する。

(2) プロセスの流れに連続とバッチが複雑に組み合わされている。

(3) 工程の各段にある装置の運転操作が、永年の経験と勘に頼っている。

これらの計装上の難点もほぼ解決され、更にこれらを集中化して中央のコントロール センターで監視・制御を行なう計測・制御システムに発展してきている。

この場合、特にマン マシン インタフェースとしては、1,000点以上に及ぶ膨大なプロセスの情報をオペレータが能率よく処理できるものが要求される。この計測、制御機能に対する要求を十分満足させることができるものとして、「ユニtrolΣシリーズ」での計装を取り上げた。

2 製糖プロセスの概要

製糖プロセスは、原料、製品の相違により、三つに分類することができる。

(1) 甘しょ(砂糖きび)から粗製された粗糖を生産する原糖工場

(2) 粗糖を原料として精製する精製糖工場

(3) てん菜(砂糖大根)から精製糖を生産するビート工場

我が国の砂糖は約85%は精製糖工場で生産され、15%は北

海道のビート工場で生産されている。精製糖とてん菜糖の製糖プロセスは異なるが、一例として精製糖のプロセスを図1に示す。

輸入された原糖は原糖倉庫に蓄えられる。原糖はミングラ、ミキサ、及び遠心分離機によって洗糖され、表面に付着した溶解性の不純物を落として、次工程に送られる。次の溶解工程で一定濃度に溶解され、ろ過器を通して不溶性の混入物が除去され、ロー リカとなる。

ロー リカに石灰乳Ca(OH)₂を一定比率で混入し、炭酸飽充槽に入れ、ボイラ廃ガスを利用して炭酸ガスを吹き込むと、石灰乳は炭酸石灰CaCO₃となって、ロー リカ中に含まれる不純物と共沈する。炭酸飽充槽を出たリカは炭酸石灰を含むスラリーなので、次のろ過器を経て沈殿物を除きブラウン リカとなる。ブラウン リカは活性炭、骨炭を充填した骨炭塔により色素、灰分を除去され、再びセラミックろ過器を通された後、脱色性イオン交換樹脂塔と、再びセラミックろ過器を経て濃縮工程に移る。

濃縮は多重効用罐で行なわれ、濃度の高くなった清澄な糖液、すなわちファイン リカは煎糖工程に送られる。

煎糖工程は結晶罐により溶液中の糖分を結晶化させる工程で、結晶は白下(しろした)と呼ばれるスラリー状態で取り出され、遠心分離機によって結晶母液から分離される。

その後しょ糖の結晶はドライヤ、クーラで乾燥冷却され、サイロ、シュガーびんに蓄え包装出荷される。

図2に製糖工場の制御の中心となっているコントロール センターの一例を示す。

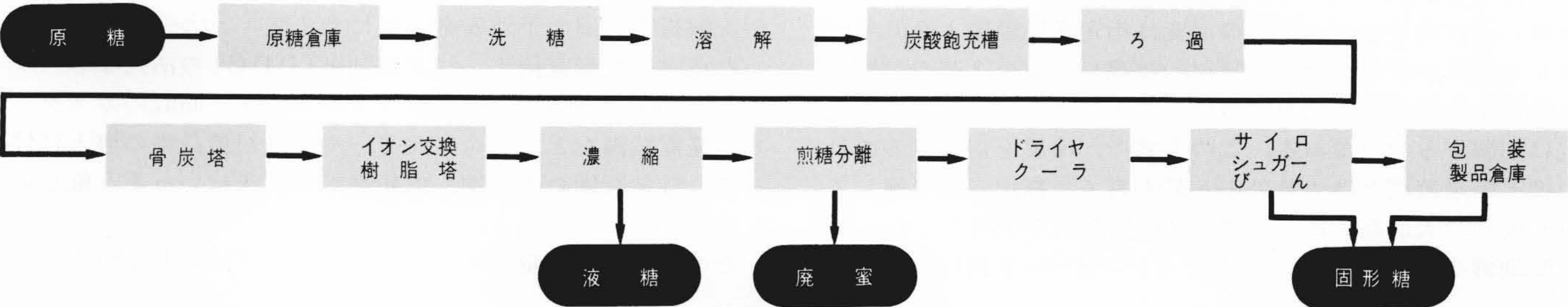


図1 精製糖の製造工程 多段の工程による装置工業である。ユーティリティなどは省略している。

* 日立製作所那珂工場

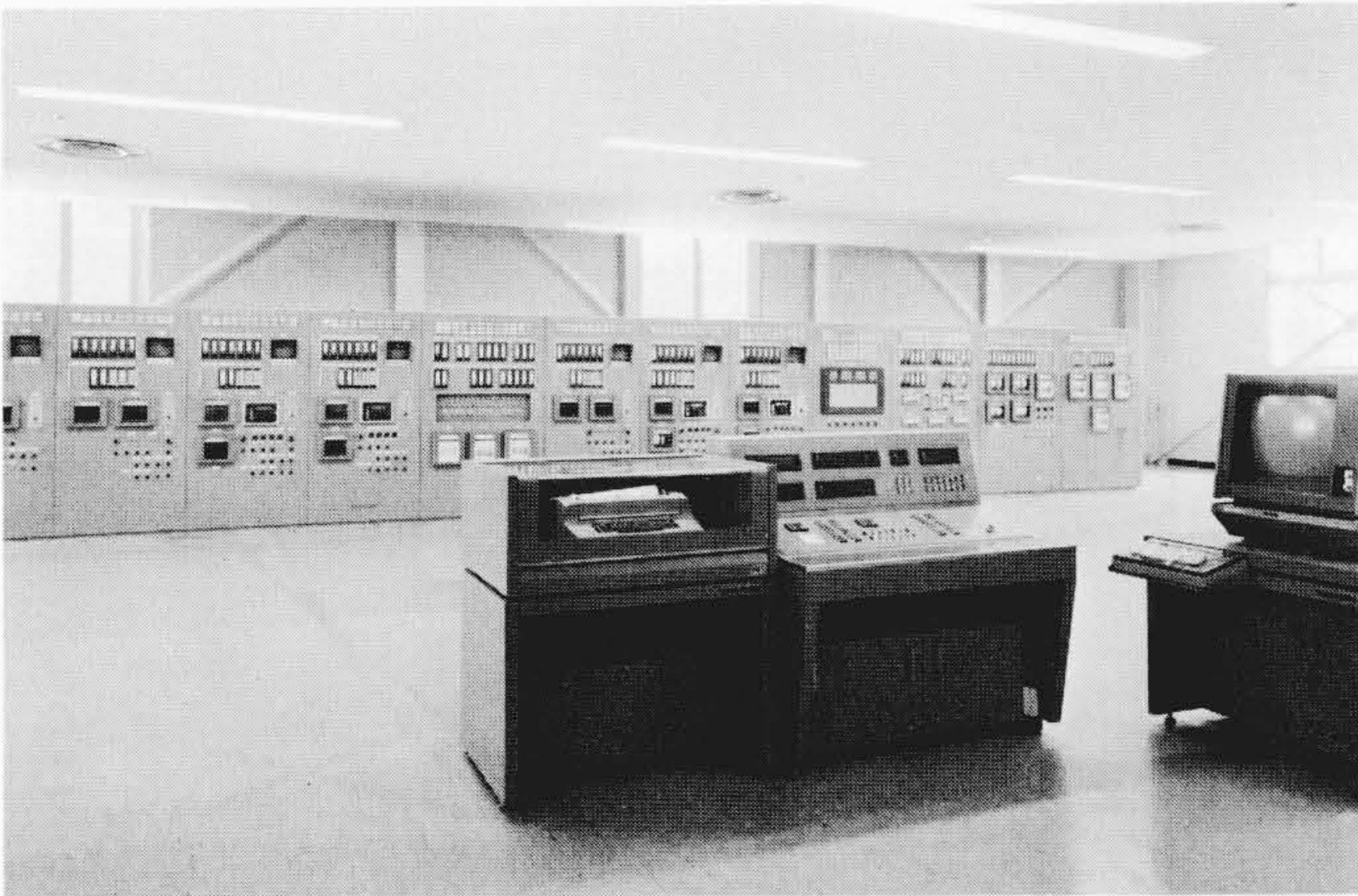


図2 コントロールセンター 近代化された製糖工場では、集中監視制御システムが導入されている。

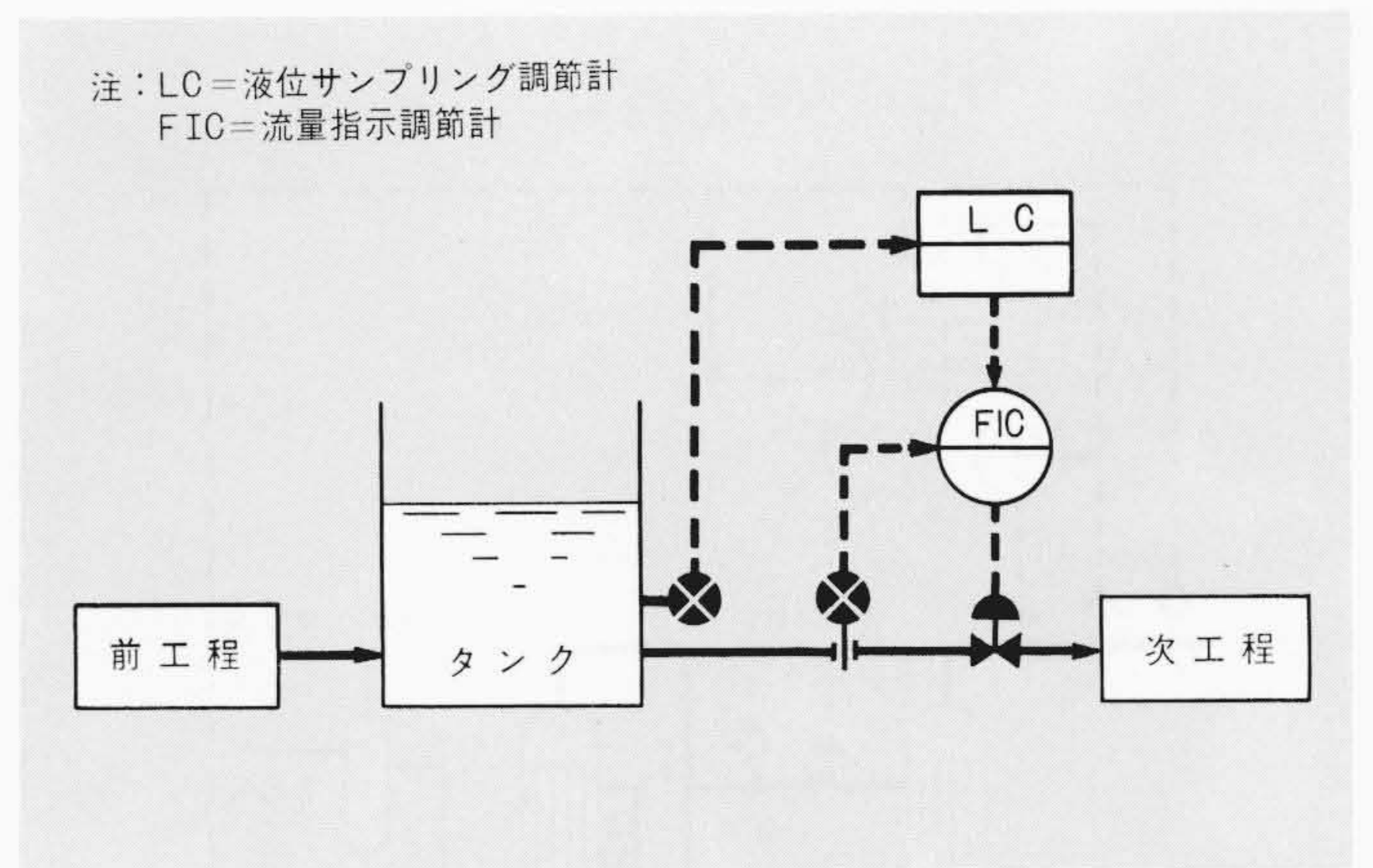


図3 均流液面制御 流量制御の設定値は、液位のサンプリング値により行なわれる。

3 製糖プロセスの計装

3.1 均流液面制御

製糖プロセスは、バッチプロセスと連続プロセスを複雑に組み合わせて構成されており、バッチプロセスであるろ過器、骨炭塔、イオン交換樹脂塔、及び結晶罐は必然的に流量の変動を起こす。しかし、連続プロセスである炭酸飽充槽や濃縮罐は、流量変動の少ない運転が望ましい。そのため、各工程間には、バッチプロセスで発生した流量変動を吸収するためのタンクが設置されている。

しかし、これらのタンクの容量は有限であるため、タンクから糖液があふれたり、タンクが空にならないように、タンクの液面を制御する必要がある。

このように流量変動の吸収を目的とした液面制御、すなわち均流液面制御は、流量変動の周期の短いプロセスでは、不感帯付、又は非線形の特性をもつ液位調節計から流量調節計へ、カスケード制御を行なうことで、制御の目的を達することができる。

製糖プロセスでは流量変動の周期が長く、前述の制御方法では困難な場合が多い。このようなときは、流量の設定値を時間的に連続して加減せず、長い周期で液位をサンプリングし、流量への設定値を調節する、いわゆるサンプリング値制御が有効である。図3の制御系でLCはサンプリング値制御を示すが、マイクロコンピュータによる分散形Direct Digi-

tal Control (以下、DDCと略す)で行なうと、更にマスバランスの制御も簡単に加えられ便利である。図4にサンプリング値制御の結果を示す。

これらの制御システムを構成する主な検出器として、液位や流量の検出にフランジ取付形の差圧伝送器と、電磁流量計とがある。両検出器の接液部は、高粘度でスラリなどの固形分を含む液体であり、検出部には、液体の腐敗の原因となるたまりが生じないようにする必要がある。また液位検出用差圧伝送器は、攪拌機などによる動圧を伴った圧力がかかるため、脈動圧信号を伝送器側で適当に減衰させるダンピング機構をもったものを使用している。

3.2 濃縮罐の計装

従来の濃縮工程は、次の煎糖工程に、飽和点近くまで濃縮して一定濃度のファインリカを供給することが目的であったが、最近では液糖として出荷される量が増大し、濃縮液の濃度を厳密に制御する要求が高まっている。

しかし、濃縮工程は前工程からの外乱が多く、濃縮液の濃度を厳密に制御することは困難である。外乱は、清浄工程の骨炭塔、イオン交換塔の塔切換、及び再溶解糖の還流による流量と、濃度の変動が主なものである。図5に薄膜流下形二段濃縮罐の計装例を示す。

濃縮液の濃度は、加熱蒸気の流量で制御されるが、濃縮液の濃度からのフィードバック制御だけでは、前述の外乱の影響とむだ時間があるため十分な制御結果を得ることができない。

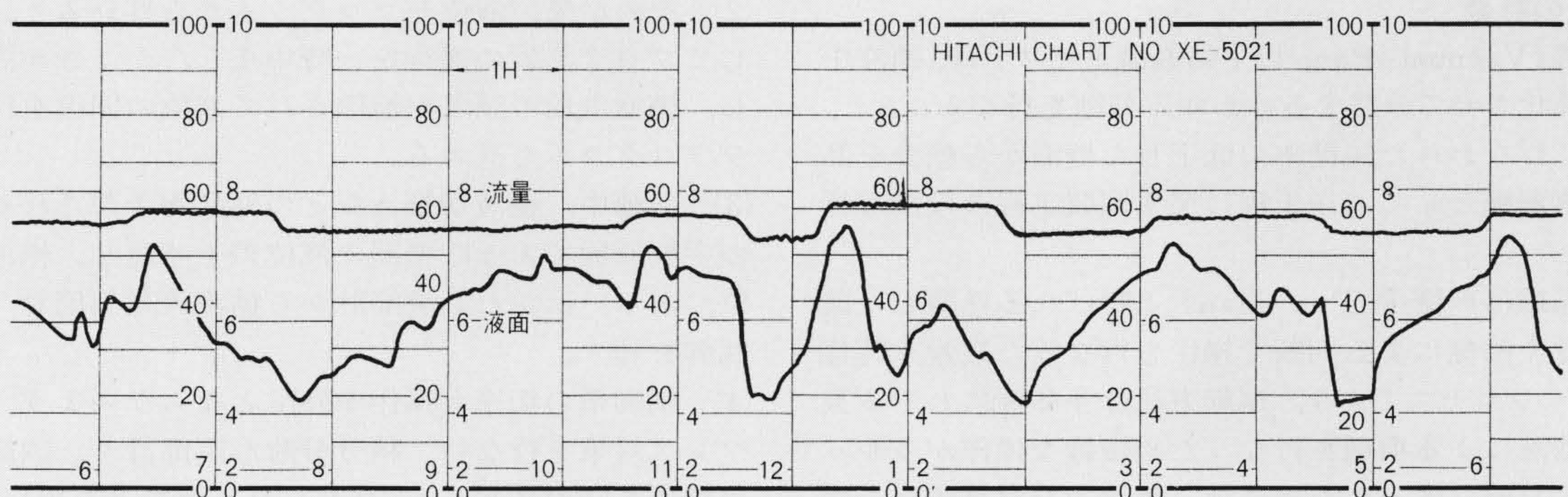


図4 均流液面制御結果 タンクのオーバーフロー、空を防止し流量変動を抑えていることが分かる。

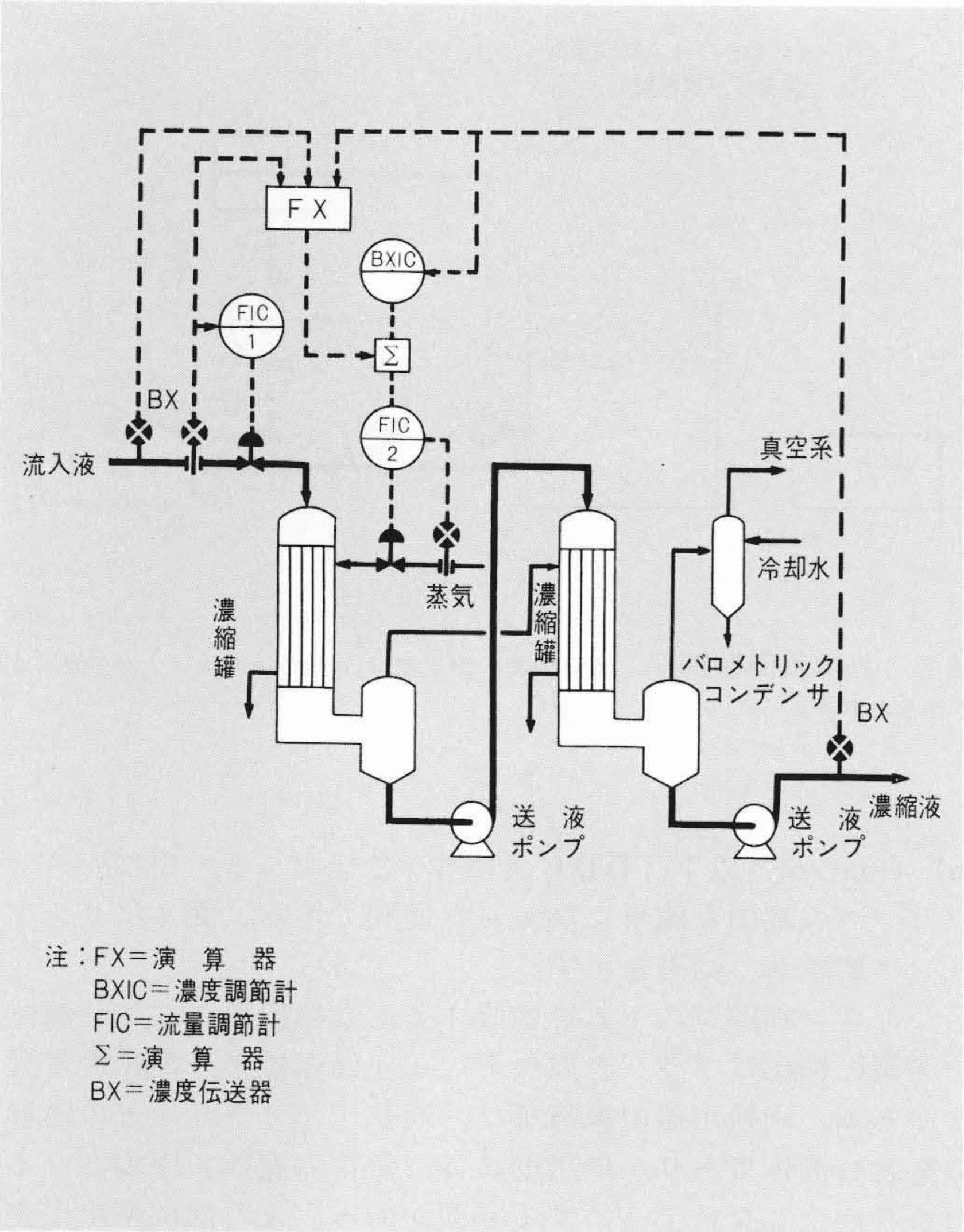


図5 濃縮罐の計装例 流入液の外乱を検出し、蒸気流量へフィードフォワード制御を付加している。

良好な制御を得るため、外乱量を検出して、予測制御を行なう、すなわちフィードフォワード制御を付加する必要がある。この場合、主な外乱は流入液の流量と濃度〔ブリックス(Bx)度〕であるから、それらの値を検出し、流入液を目的とする濃度まで濃縮するに必要とする蒸気流量を求める。その値を先行信号として、濃度調節計の出力信号に加算し、加熱蒸気量の制御を行なう。

この制御方式により、濃縮罐の能力範囲内で、十分に精度高く良好な濃縮液の濃度を制御することができる。

このようなフィードフォワードを含む多変数制御は、DDCを用いれば容易に実現でき、しかも演算定数の変更は極めてフレキシブルとなる。

また、高精度の濃度測定には、 γ 線密度計が適している。プロセス配管の外側から直接測定が可能であり、流体に接触しないので、保守も容易である。

3.3 結晶罐の計装

真空結晶罐 (Vacuum Pan, 以下結晶罐と略す) は、糖液中の糖分を結晶化させて分離するいわゆる煎糖を行なうことと、煎糖を繰返し行なわれた純糖率の低下した糖液から糖分を晶析させ、再溶解糖として清浄工程に戻す回収工程の役割も行なう。

従来、結晶罐は煎糖手 (Pan Man) と呼ばれる熟練した運転員が、視覚や触覚による判断で操作を行なった複雑な特性をもつバッチプロセスであり、運転方法は多品種にわたる製品と多種の糖液による煎糖を行なうため複雑な操作が多かった。計装方式を確立させるためには、理論的な結晶成長のプロセスモデルを検討し、更に具体的な操作方法の対応を実際の結晶罐について実験した。

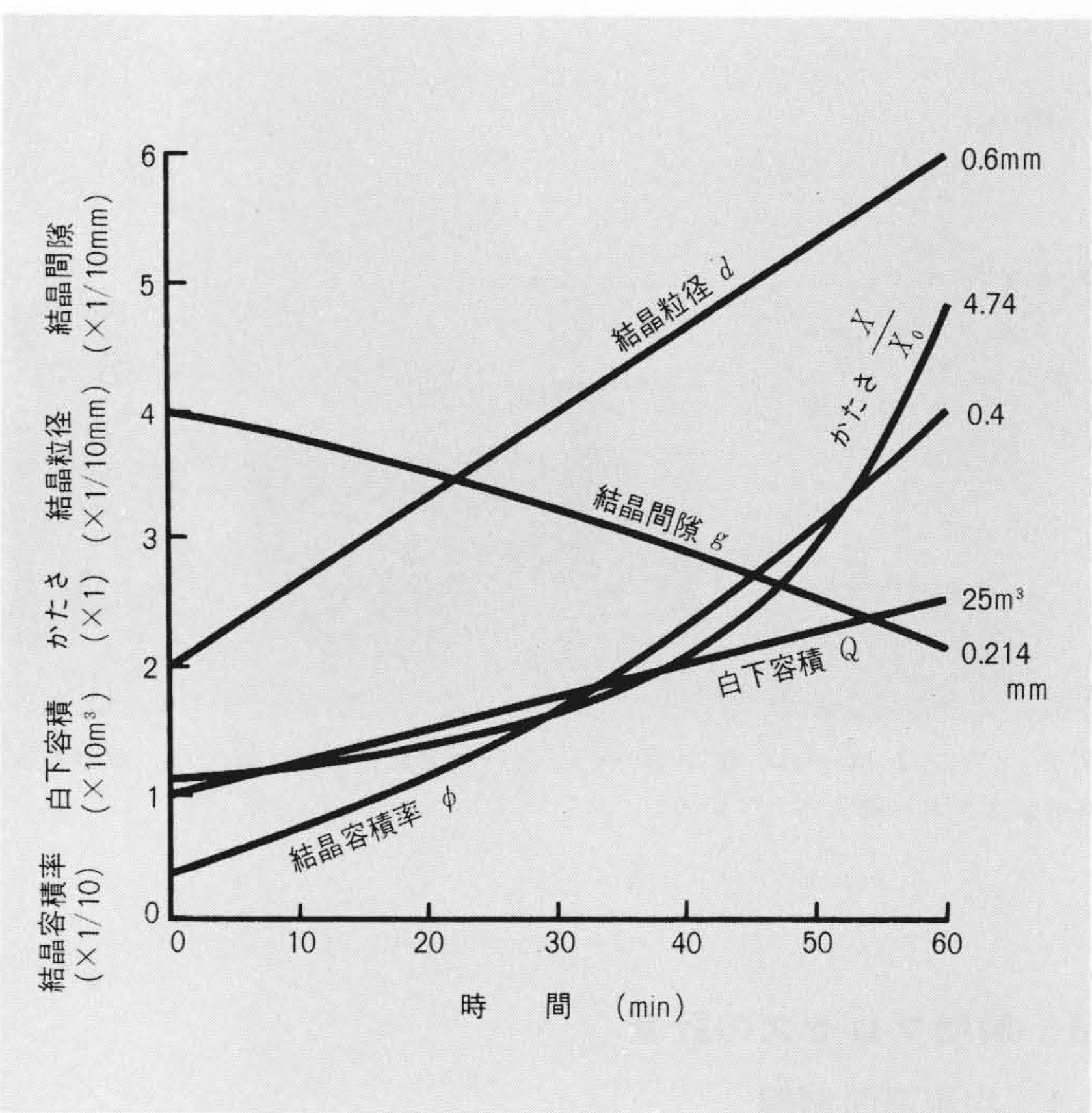


図6 育晶モデル 結晶成長の時間的経過を示す。結晶粒径、結晶容積率を計測することは困難なので、代わりに白下容積とかたさをプログラム制御している。

3.3.1 制御方式

図6に結晶成長の際の各パラメータの時間経過を示す育晶モデルを示す。一方、結晶罐内の状態を定めるには、結晶の成長速度と、白下の容積増加率について独立に時間的な経過を指定する必要がある、それによってすべてが規定される。

これらの点から、結晶の平均粒径と結晶容積率をプログラム制御することが考えられるが、いずれも現段階では計測することが難しく、代わりになるパラメータとして白下容積、すなわち罐内液位とかたさをプログラム制御することにした。この場合、かたさの経時変化は一様でなく、直線で近似することはできない。

3.3.2 結晶罐の運転

図7に結晶罐の計装例を、図8にこの結晶罐の運転タイムチャートを示す。結晶罐の自動煎糖については、計装運転に各種の考慮がなされている。

- (1) 相互干渉系であるため、制御系に優先順位をもたせ、糖液供給量は通常は罐内液位プログラムで制御されているが、かたさが設定値より低くなると、液位の調節信号より優先して糖液供給量を制限する。
- (2) その結果、液位がプログラムから外れると、偏差を検出してプログラムの進行を一時中止し、かたさが設定値に復帰し、糖液供給の制限が解除されて液位の回復を待った後、再びプログラムを進める。
- (3) 煎糖中、糖液切換えなどの外乱が予想されるので、外乱の主要原因である貯槽間の液位差を考慮し、糖液供給には液位、あるいはかたさ調節計から糖液流量調節計へカスケード制御を施す。
- (4) 制御系の切換え操作が外乱とならないよう、各所にバンプレス対策を行ない、積分分離形調節計や、調節弁操作信号の急変を防ぐスピードコントローラなどを用いる。

このようなバッチプロセスの運転には、アナログ制御とシーケンス制御とが混合されており、しかも判断による切換え

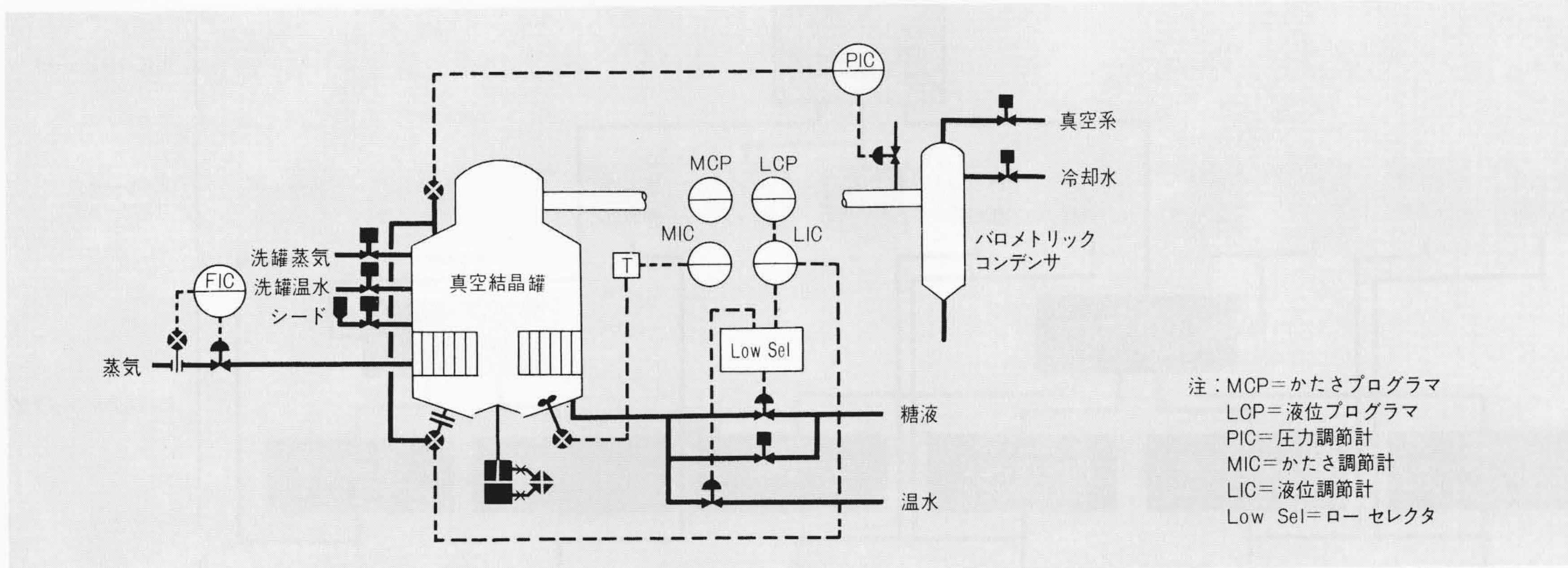


図7 結晶罐の計装例 一工場に結晶罐が5～7罐あり、品種により各罐多少異なっている。本図は上白糖、グラニュー糖用を示す。

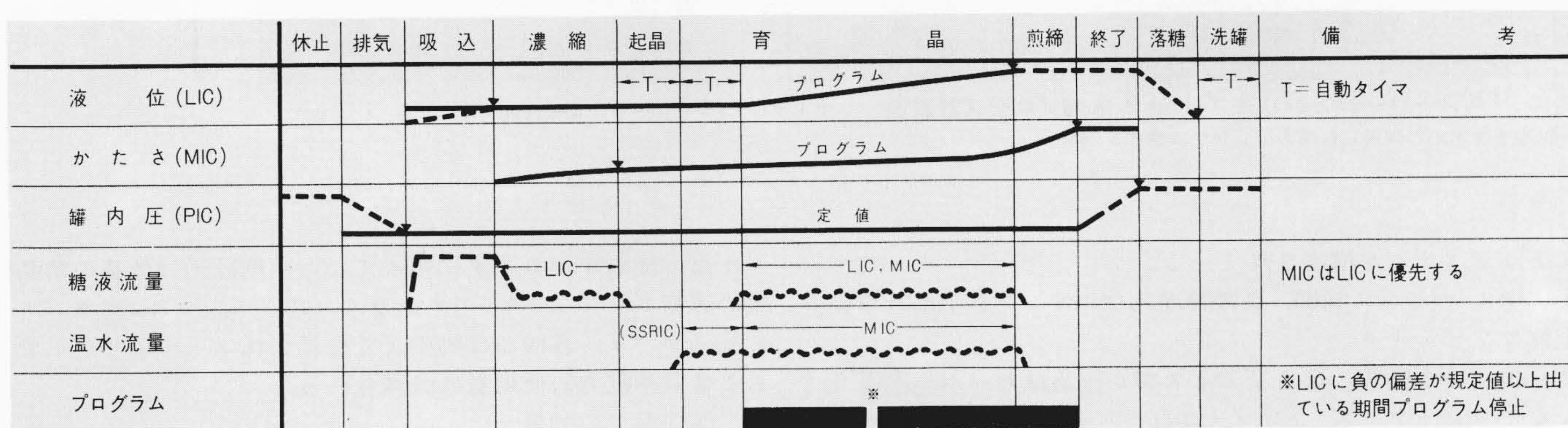


図8 結晶罐タイムチャート 1バッチはグラニュー糖で、約1時間かかる。プログラム曲線は結晶罐の特性を考慮しなければならないため、各罐ごとに異なる。

を要することから、融通性にとむマイクロコンピュータによる制御が特に適している。

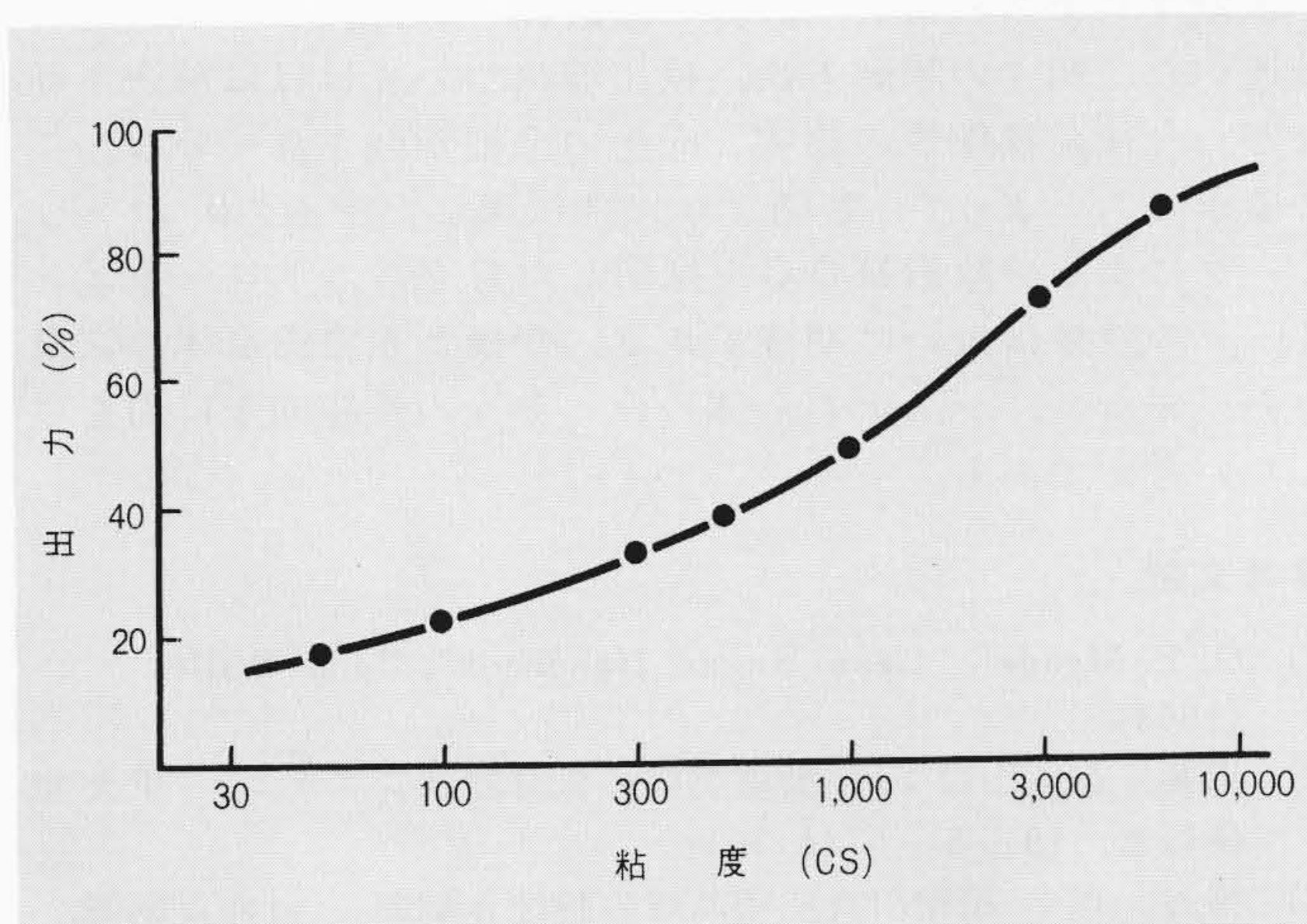


図9 日立CMT形硬さ計出力特性 白下の結晶容積率をかたさ計で検出している。ゼロとスパンの校正は、空転とロックの位置であるので極めて簡単にできる。

3.3.3 結晶罐専用の検出器

結晶罐制御に独特の計器であり、育晶時期の結晶罐の最も重要な制御項目のかたさの検出器であるかたさ計は、測定液体中で電動機により羽根をもった軸を回転させ、その反力を電動機負荷として検出する方式のものである。電動機に直流分巻電動機を用いて広い測定範囲をもたせ、濃縮から落糖時まで、再現性の高い信号が得られる。

またかたさ計は、類似した製品を扱う晶析装置や、発酵装置へ結晶の容積含有率計として使用されている。図9に日立CMT形硬さ計の特性を示す。

4 計装システム

4.1 構成

以上、個々の制御方法、検出器について述べたが、これらのアナログ制御、シーケンス制御及びDDC制御が混在した製糖プロセスの計装システムは、在来の工業計器の組合せによる計装では複雑になり、また高級な制御を行なうことは難しい。一方、プロセスは多数の工程に分割され監視されているので、プロセスに対応のとれたシステム構成が必要である。

これらの要求に十分満足できるものとして、分散形DDCを全面的に採用した「ユニトリールΣシリーズ」で構成した計測・制御システムを図10に示す。全体として次の四つの部分

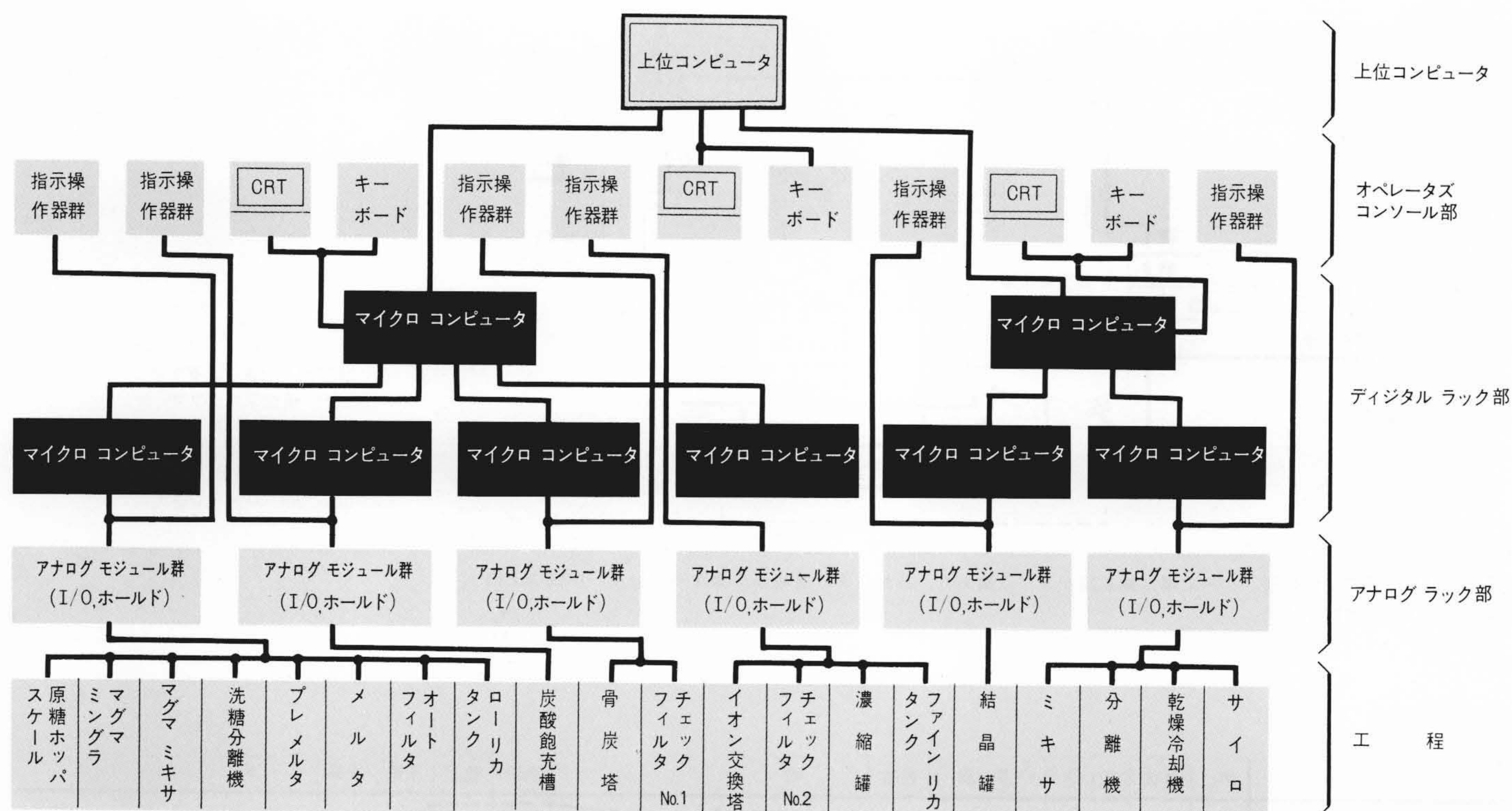


図10 「ユニットロールΣシリーズ」による精糖プロセス計装例
マイクロコンピュータによる分散形DDCを全面的に採用した場合のシステム構成を示す。

によりシステムが構成されている。

- (1) マス バランス制御、品質管理及びロギングを主に行なう上位コンピュータ
- (2) 指示操作器群、CRTディスプレイ及びキーボードよりなるオペレータズ コンソール部
- (3) 下位のマイクロ コンピュータと上位コンピュータとのインタフェースと、マン マシン インタフェースを制御するマイクロ コンピュータによるコントロール部
- (4) シーケンス制御、DDCを行なうマイクロ コンピュータ群
- (5) プロセスとの入出力及びバックアップを行なうアナログモジュール群 これらのうち、(3)、(4)はデジタル ラック群に、(5)はアナログ ラック群に収められる。

4.2 特 長

従来のアナログ計器及び有接点リレーによる制御システムと、分散形DDCシステムの構成をとった日立ユニットロールΣシリーズを比較すると次の特長が挙げられる。

(1) 省力化

膨大なプロセスの情報は、CRTディスプレイにより能率よくオペレータに伝達され、制御は各工程と対応した分散形DDCにより確実にこなされている。オペレータによる操作は機能の集中しているキーボードの操作だけでよく、オペレータの負担は数分の一に軽減される。

(2) 安全運転

プロセスは分散形DDCによるモニタリングがなされており、広範囲の異常検出と処理により、運転の安全性が飛躍的に向上する。万一のマイクロ コンピュータ ダウンによる影響は最小限度の工程にとどめられ、危険分散ができる。

(3) 生産性の向上

オペレータの個人差による品質のばらつきが除去でき品質の均一化に役立つ。

また、従来オペレータに頼っていた煎糖計画（数基の結晶罐の運転スケジュール）のオンライン処理や、マス バランスの制御ができ、各機器は効率よく稼働されユーティリティである蒸気や電力の使用量は低減される。

(4) 保守面での効果

計測・制御システム全体は、寿命の短い有接点リレーを最小限度にとどめ、半導体化により長寿命、高信頼性である。また、マイクロ コンピュータのソフトウェアは仕様変更に対して極めて柔軟な方式であり、保守性の改善度は大きい。

更に、プロセスと計測制御システムが情報を取り合う入出力機器は、各制御ループごとにモジュール化されており、保守、点検が極めて簡単である。

5 結 言

製糖プロセスの特有の計装と、計測・制御システムについて述べた。個々の制御方式、検出器についてはほぼ解決されたが、今後、操作性の改善と向上の余地が残されている。この要求とあいまって、製糖プロセスに適したマイクロ コンピュータによる分散形DDCを採用した日立ユニットロールΣシリーズの効果は大いに期待できる。今後とも設備自体の改良とあいまって、システム全体のいっそうの性能向上に力を尽したい考えである。

参考文献

- (1) G. P. Meade: "Cane Sugar Handbook", John Willey (1963)
- (2) 沢井, 森, 山口: 「精製糖工程の総合制御システム」 東大生研報告, 19, 5 (昭44-10)
- (3) 梅谷, 森: 「精糖用真空結晶罐の特性と制御」, 計測と制御, 6, 11, 771~781 (昭42-11)
- (4) 小宮山, 白石: 「製糖プロセスにおける真空結晶缶の計装」, 15, 4, 1~7 (1972-4)