

# LSI製造プロセス仕様の診断エキスパートシステム

## Rule-Based Diagnostic Expert Systems for LSI Manufacturing Process Flow

LSIの高集積化に伴い、その製造プロセスは複雑化しており、汚染・最適条件などに関する多数のプロセス上の知識に合致したプロセス仕様を、いかにして効率的に設計するかが問題となりつつある。

この問題に対処するため、プロセス仕様中のミスや疑問点を指摘してプロセス仕様の設計を支援するエキスパートシステムを開発した。本システムを適用した結果、高速でプロセス仕様をチェックでき設計作業を効率化できた。従来、プロセス仕様をチェックしてきたエキスパートは負担を軽減され、プロセス設計の質的向上につながる、より高度な検討を行うことが可能になった。

本稿では上記システムのニーズ、診断方式及び効果について述べる。

船越清彦\* Kiyohiko Funakoshi

水野和志\*\* Kazushi Mizuno

### 1 緒言

LSIの高集積化・微細化に伴い、その製造プロセスは数百工程を超える複雑なものとなっている。これをいかにして効率的に設計し、処理していくかが研究、開発、生産の各段階で重要な課題となってきた。このため、従来経験と勘に頼っていたプロセスの設計、実行、解析をコンピュータによって支援するCIM/CAM(Computer Integrated Manufacturing/Computer Aided Manufacturing)システムが内外各社で開発されつつある<sup>1)~4)</sup>。

LSIプロセスにはプロセス仕様の設計、不良解析、装置の故障診断などに関する多数の知識があり、これらの知識を活用することがCIM/CAMシステムのかぎである。既に、不良診断、処理スケジュールの作成、装置の故障診断などのエキスパートシステムが報告されており、今後ますます増加すると考えられる<sup>5)~10)</sup>。

今回、エキスパートシステムのLSIプロセスへの応用の一つとして、プロセス仕様中のミスや疑問点をチェックして、プロセス仕様の設計を支援するエキスパートシステムを開発した<sup>11)</sup>。プロセス仕様のチェックは、(1)専門知識が必要であること、(2)明確な知識が多いこと、(3)研究開発や多品種少量生産では日常的に不可欠な業務であること、(4)エキスパートが少ないこと、などの点でエキスパートシステムが構築できれば、非常に効果を発揮できる課題である。

本稿では、このプロセス仕様診断エキスパートシステムのニーズ、診断方式、適用結果と効果について述べる。

### 2 LSI製造プロセスの設計

LSI製造プロセスの概略と、プロセス仕様設計上の問題点について述べる。

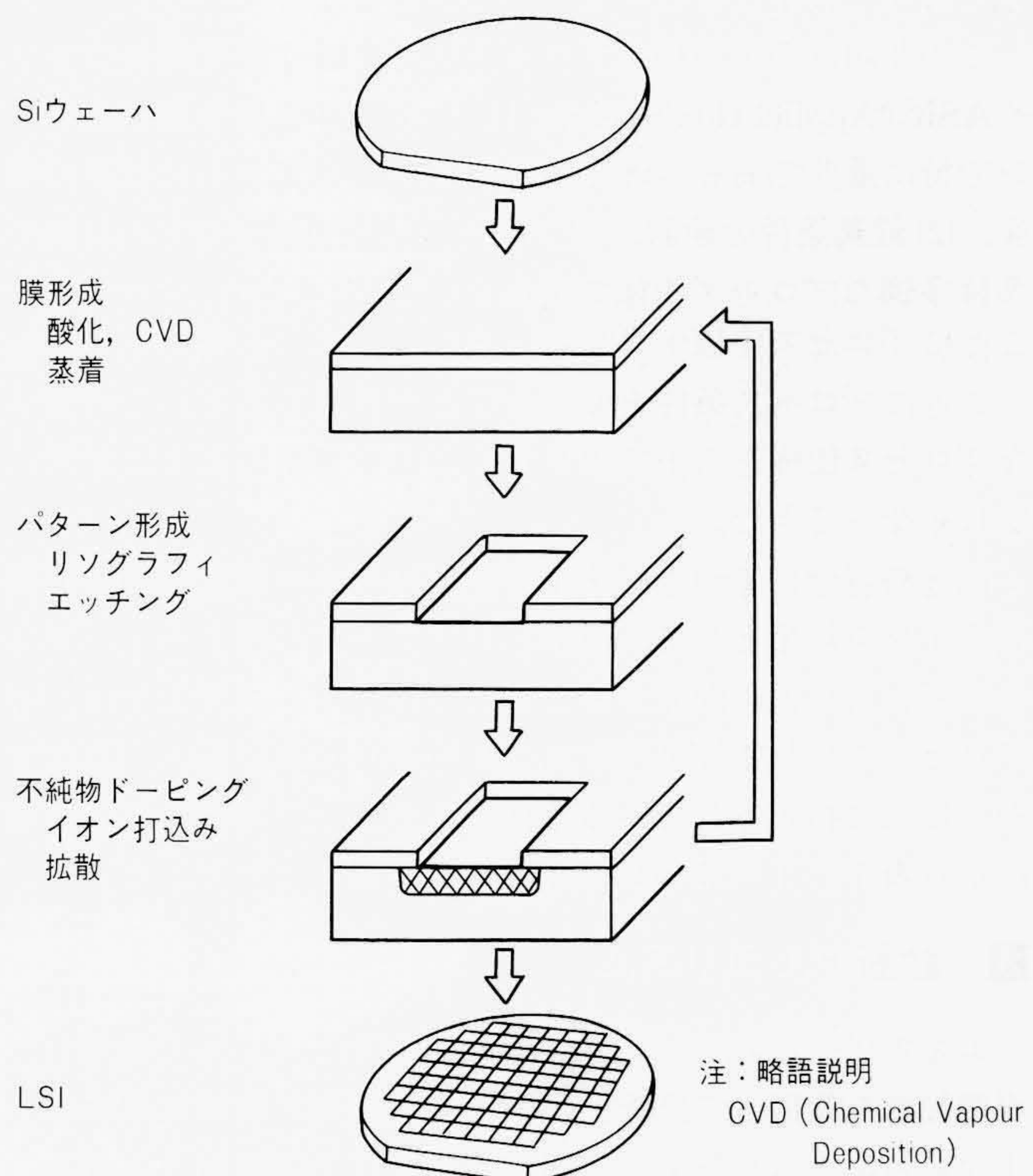


図1 LSI製造プロセスの概念図 膜形成、パターン形成、不純物ドーピングを繰り返して、Siウェーハ上にLSIを形成する。

LSI製造プロセスは図1に示すように、膜形成、パターン形成、不純物ドーピングなどの工程を繰り返して、Siウェーハ上にLSIを形成するプロセスである。LSIの高集積化と最小加工寸法の微細化に伴い、LSIプロセスはますます複雑・長大なも

\* 日立製作所中央研究所 \*\* 日立超LSIエンジニアリング株式会社



のとなっている。例えば、現在開発中の16M DRAM(16M Dynamic Random Access Memory)では、最小加工寸法は約0.5 μm、工程数は数百を超え、現代工業の中でも最も複雑な製造プロセスの一つとなっている。

LSIプロセスは汚染やじんあい非常に敏感であり、微量の有機物汚染によって膜形成が不均一になったり、0.1 μm程度のじんあいによってパターン不良が発生する。また、LSIプロセスでは多数の工程の処理条件がLSIの特性に複雑に影響する。このため、LSIプロセスには表1に示すような処理条件、工程の順序、汚染、物質などに関する多数の知識がある。これらの知識に反したプロセス仕様でSiウェーハを加工すると、目的とするLSIが得られないだけでなく、装置を汚染し、他のウェーハまで不良になるなど、重大な事態を引き起こす。

したがって、プロセス仕様の設計では、プロセスの知識を厳守しなければならない、仕様に誤りがないか詳細にチェックする必要がある。従来、このチェックはLSIプロセスのエキスパートによって行われてきた。しかし、プロセスが複雑化・多様化するに従って、(1)チェックの所要時間の増大、(2)チェックミスの増加、(3)エキスパートの不足などが問題となっていており、人手によるチェックは困難になっている。

この問題は多種多様なプロセス仕様を扱う研究開発ラインやASIC(Application Specific IC)などの多品種少量生産ラインで特に重要である。研究開発では、(1)新プロセス技術の開発、(2)最適条件の検討、(3)プロセス仕様の確認などの目的で多種多様なプロセス仕様で試作を行う。すなわち、一ロット<sup>※)</sup>ごとにプロセス仕様が変わる。また、一ロット内でもウェーハごとにプロセス条件を変えることが普通である。このようなプロセス仕様を人手で誤りなくチェックすることは非常に難しくなってきた。

以上の背景に基づき、まず日立製作所中央研究所の研究開発ラインを対象として、設計したプロセス仕様をチェックする診断システムを開発することにした。本システムでは、(1)プロセスに重大な影響を持つ、(2)明確な知識が多い、(3)プロセス仕様に指定されている条件からチェック可能、という理由から表1の1～3のレベルの知識を扱うこととした。

3 診断アルゴリズム

エキスパートシステムではIF/THEN形のルールで表現した専門知識を使用して診断を行うが、更に問題固有の処理手順、すなわちエキスパートが問題を処理する手順を取り入れることによって診断能力を向上できる。本システムでは、エキスパートがプロセス仕様を設計・チェックする手順を取り入れた診断方式を工夫した。

エキスパートによるプロセス仕様の設計・チェックの手順を図2に示す。目標の構造・特性を実現するように、プロセスの知識・基礎データを参考にして、ウェーハの状態を机上でシミュレーションしながら条件を決定・チェックしていく。

※) ロット：LSIを製造する単位で、通常、Siウェーハ25～50枚から成る。

表1 LSI製造プロセスの知識の例 LSI製造プロセスには処理条件、工程の順序、汚染、物質などに関する多数の知識がある。レベル1～3が本システムの対象である。

| レベル | 対 象     | 内 容 ・ 例                                               | 重 要 度<br>禁止・強制←→推奨 |
|-----|---------|-------------------------------------------------------|--------------------|
| 1   | 許容条件    | 処理条件の許容値・許容範囲<br>例：酸化温度の上下限                           | ○                  |
| 2   | 工程の順序   | 順序の決まっている一連の工程<br>例：前洗浄→拡散→後処理                        | ○                  |
| 3   | ウェーハの状態 | ウェーハ上の物質とプロセス装置の関係<br>例：重金属(W, Tiなどは、クリーンな炉に入れてはならない。 | ○                  |
|     |         | 汚染とプロセス装置の関係<br>例：クリーンな炉には、すべての汚染を持ち込んではない。           | ○                  |
|     |         | 物質の状態と処理条件の関係<br>例：ホトレジストの状態(膜厚、ベークの有無)と除去方法          | ○                  |
| 4   | 最適条件    | 目標構造と処理条件                                             | ○                  |
|     |         | 目標特性と処理条件                                             | ○                  |

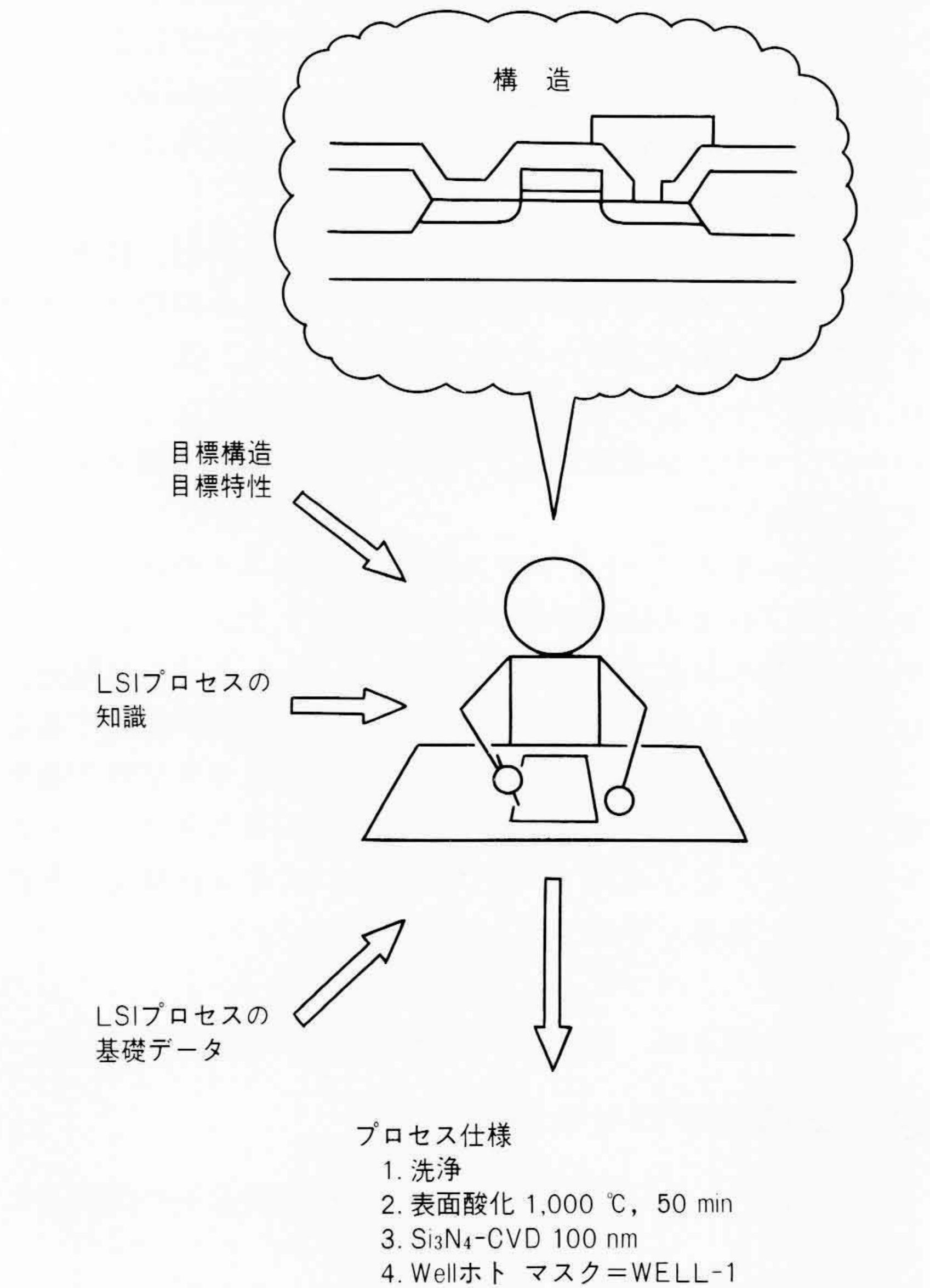


図2 LSIプロセス仕様の設計方法 目標の構造・特性を実現するように、LSIプロセスの知識や基礎データを参考にして、机上でシミュレーションしながらプロセス仕様を決定していく。



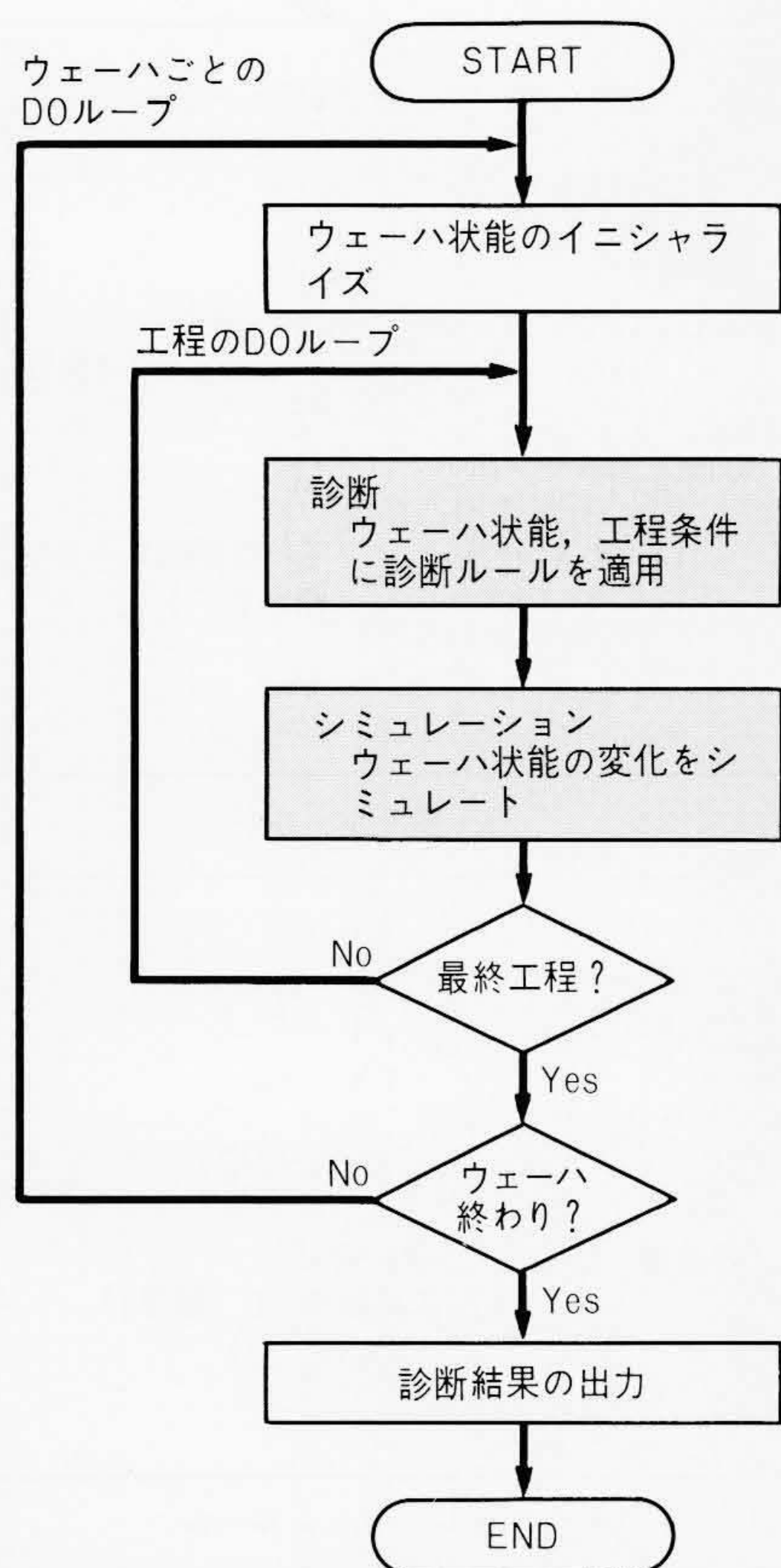


図3 LSIプロセス仕様の診断方式 工程順に診断とウェーハ状態のシミュレーションを繰り返す。

ここでウェーハの状態とは、ウェーハ上に存在する物質とその物理的・化学的性質、汚染の有無などを指す。ウェーハの状態は、(1)ウェーハ上の物質や汚染がプロセスの結果に大きく影響する、(2)各工程の処理条件がウェーハの状態を決定するという点で重要である。

上記の手順を参考にして、図3に示す診断方式を工夫した。各工程で、まず、その時点でのウェーハに対し、その工程の処理を行ってよいか、診断ルールを工程の条件とウェーハの状態に適用して診断する。次に、その工程によるウェーハ状態の変化をシミュレートする。本システムでは、物質の有無や汚染の種類など、マクロなウェーハ状態を扱い、プロセスCADで扱うような詳細な構造や不純物分布は扱わない。したがって、ウェーハ状態のシミュレーションもルールベースで行うことにした。

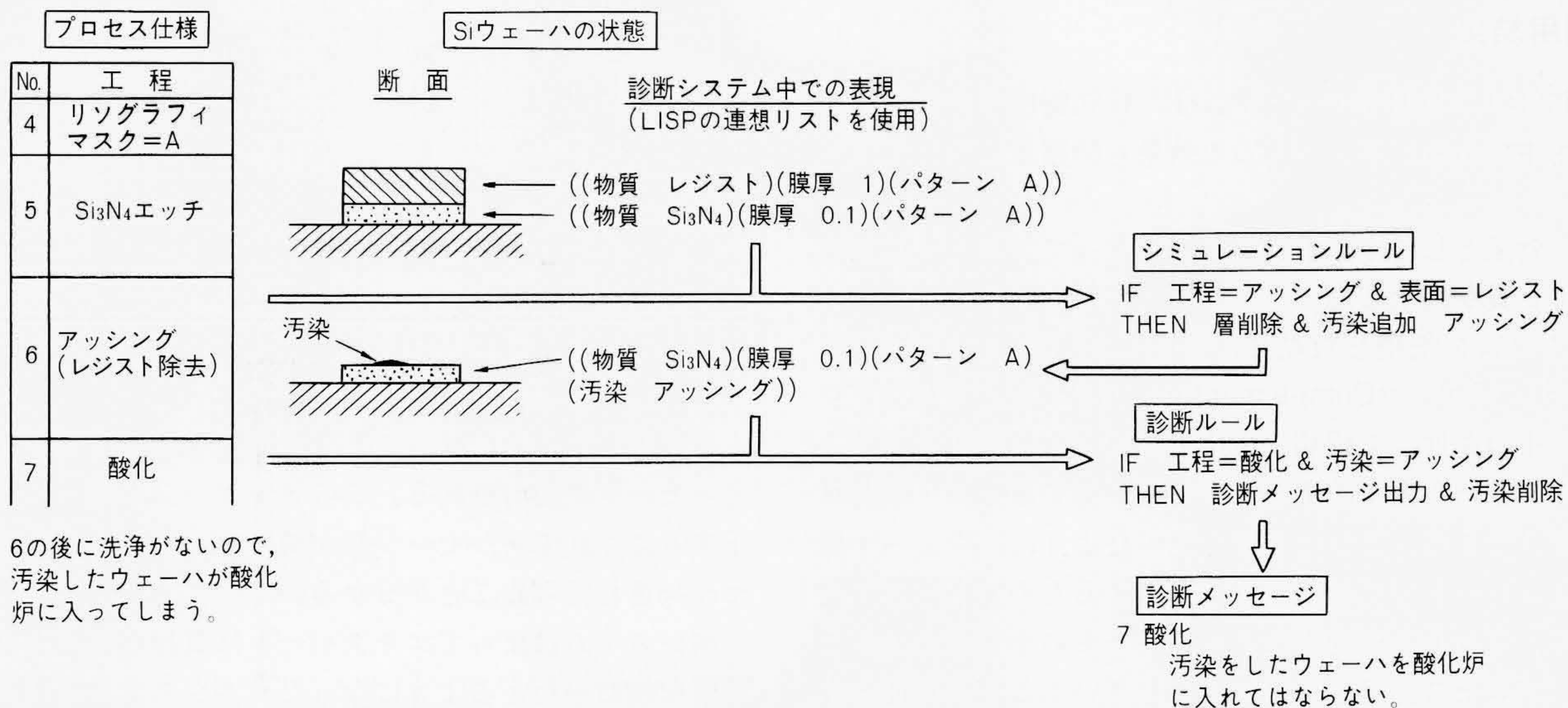
以上の処理を、最初の工程から最後の工程まで、更に一ロット内の全ウェーハについて繰り返す。

本方式による診断の例を図4に示す。同図のプロセス仕様では6のアッシングの後に洗浄工程が抜けているため、汚染したウェーハがクリーンな酸化炉に入ってしまう。本診断方式では、汚染の付着をシミュレートすることによって、この問題点を容易に指摘することができる。また、本方式ではアッシングと酸化の間に他の工程が入っても確実に診断することが可能である。

本診断方式には以下の特徴がある。

- (1) LSIプロセスに重大な影響を与える汚染・不純物に関するチェックが可能である。
- (2) ウェーハ状態のシミュレーションを取り入れたことによって、MOS(Metal Oxide Semiconductor)、バイポーラ、実験的プロセス仕様など、多様なプロセス仕様のチェックが可能である。
- (3) 全ウェーハの全工程を確実にチェックする。

プロセス仕様診断システムは、日立製作所中央研究所のLSI研究開発を支援するプロセスLAシステムの一部としてホストコンピュータ上で実現した<sup>12)</sup>。診断システムの構成を図5に示す。本システムは、(1)知識処理に適している、(2)ホストコンピュータ上で使用可能、(3)高速であることから、VOS 3



6の後に洗浄がないので、汚染したウェーハが酸化炉に入ってしまう。

図4 プロセス仕様診断の例 アッシングの後に洗浄を忘れたので、汚染したウェーハがクリーンな酸化炉に入ってしまう。汚染の付着をシミュレートすることによって、プロセス仕様のミスを容易に摘出できる。



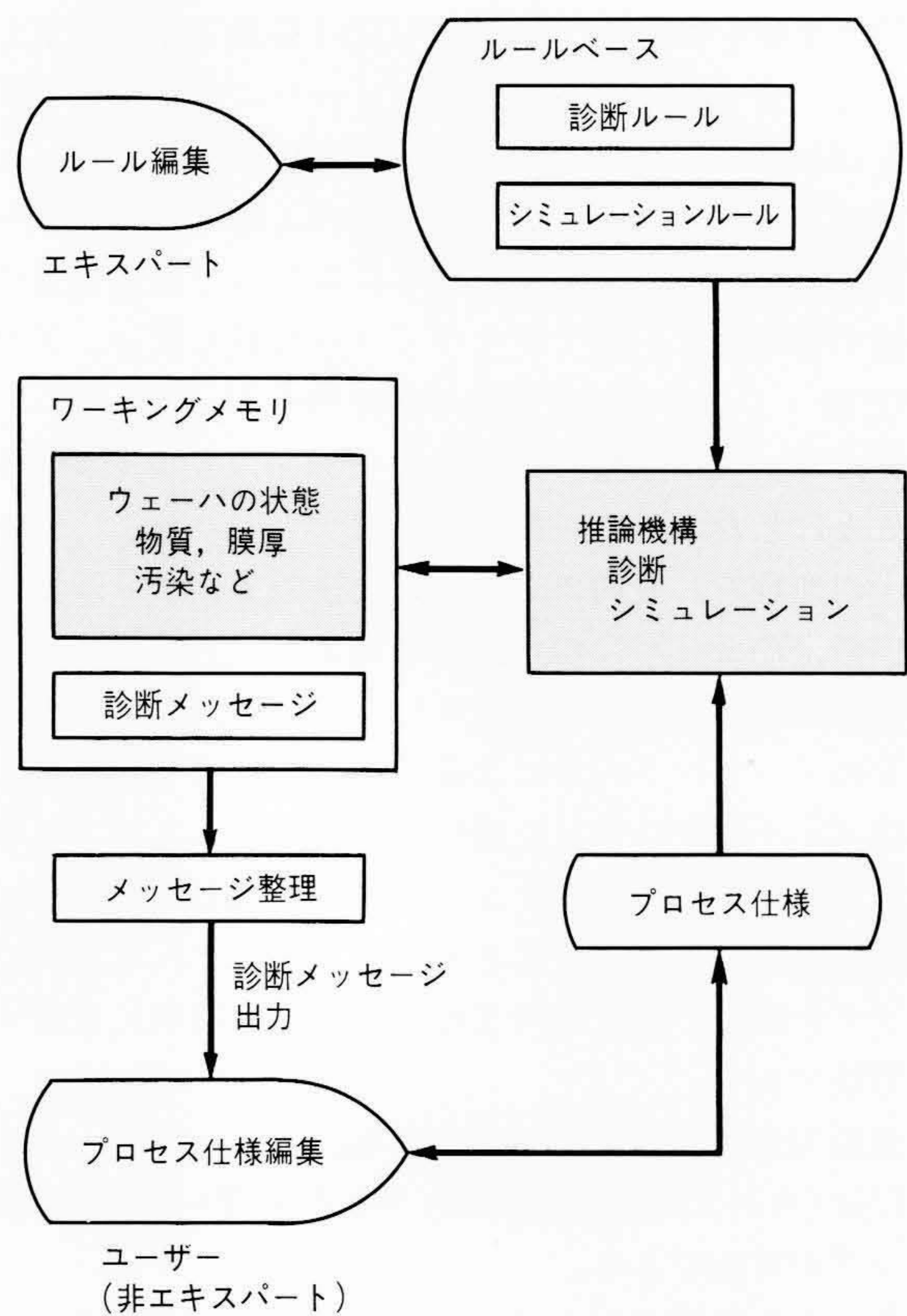


図5 プロセス仕様診断エキスパートシステムの構成 ワーキングメモリ中にウェーハの状態を記録する。推論機構はプロセス仕様とウェーハの状態にルールを適用して診断を行う。

(Virtual-storage Operating System 3) LISPで記述した。システムの規模は7kステップである。

次に、ルールの例を図6に示す。(a)はアニール工程へのレジストの持込みをチェックする診断ルール、(b)はSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>のCVD (Chemical Vapour Deposition)工程をシミュレートするシミュレーションルールである。ルール数は診断ルールが約140、シミュレーションルールが約60である。

4 適用結果

VLSIプロセス仕様診断システムは、日立製作所中央研究所内で使用中である。本システムの効果と問題点について述べる。

まず、効果としては、本システムによってプロセス仕様設計の効率と質が向上した。

本システムを使用した結果、実際にMOS、バイポーラ、BiCMOS(バイポーラComplementary MOS)など多様なプロセス仕様中の条件、工程順、汚染・物質などに関するミス・疑問点、すなわち表1の1～3の知識に関するミス・疑問点をチェックできた。これは3章で述べたように、ウェーハ構造をシミュレートして診断する方式によるものである。これによって、プロセス研究者はエキスパートの手を煩わせることなく、プロセス仕様をリファインしていくことが可能となった。プロセス仕様を設計する過程で、本システムを使用したときのメッセージ数の変化を表2に示す。最初に本システ

```
((タイプ 診断)
(ルール名 アニール-D-1)
(ルール
;IF
(COND ((AND (EQ *タイプ* 'アニール)
(EQ (層項目検索 (層数検索) '物質) 'レジスト)
;THEN
(診断メッセージ出力
"「アニール-D-1 必須」"
"レジストの付いたウェーハは処理できません。"
"レジスト除去処理が必要です。")
(層削除))))))
```

(a) 診断ルール

```
((タイプ シミュレーション)
(ルール名 CVD-S-1)
(ルール
;IF
(COND ((EQ *メニュー* 'Si3N4-CVD)
;THEN
(層追加 '((物質 Si3N4-CVD)
(膜厚 (工程検索 0 '膜厚))
(表面 親水性))))))
```

(b) シミュレーションルール

図6 ルールの例 (a)は診断ルール、(b)はシミュレーションルールである。IF/THEN形式で、LISPで記述する。

表2 プロセス仕様設計過程での診断メッセージ数の推移の例 設計の初期にはプロセス仕様中に多くのミスが含まれており、多数の診断メッセージが出力される。仕様のリファインが進むにつれてメッセージ数は減少する。

| プロセス仕様 | 診断メッセージ数 |   |   |   |   |   |
|--------|----------|---|---|---|---|---|
|        | 1        | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| A      | 2        | 0 | — | — | — | — |
| B      | 6        | 0 | — | — | — | — |
| C      | 39       | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 |
| D      | 3        | 2 | 0 | — | — | — |
| E      | 8        | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| F      | 5        | 2 | 1 | 1 | 0 | — |
| G      | 10       | 0 | — | — | — | — |
| H      | 0        | 1 | 0 | — | — | — |

ムを使用したときには、ミスや疑問点を指摘する多数の診断メッセージが出力される。このメッセージに従って仕様を修正するにつれてメッセージ数が減少し、プロセス仕様のリファインされていくことが分かる。

本システムによってエキスパートは負担が軽減され、より高度な検討を行えるようになった。本システム適用後も、確認のため、プロセス仕様は最終的にはエキスパートがチェックする。エキスパートによって指摘されたミス・疑問点を整



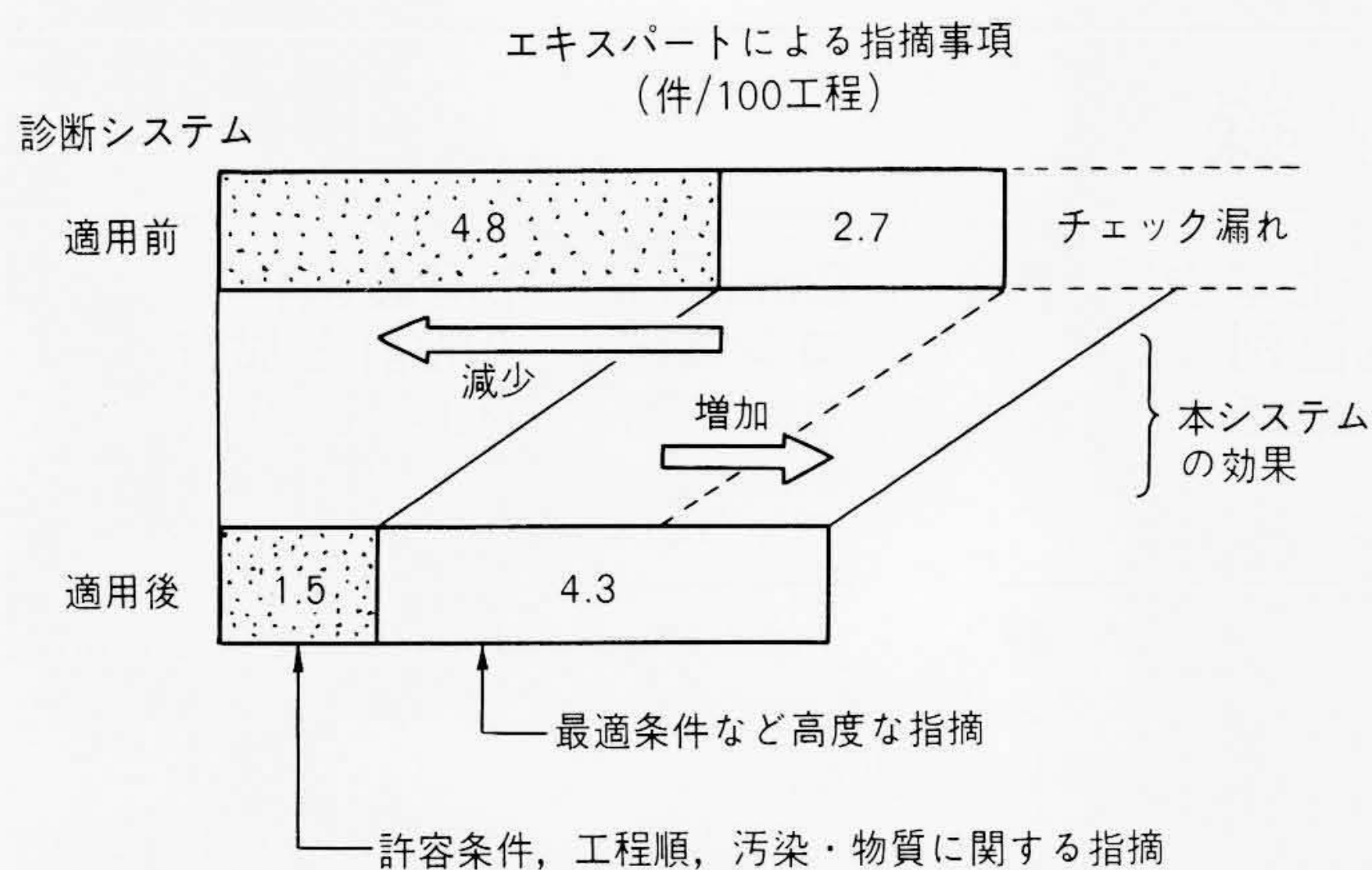


図7 プロセス仕様診断システムの効果 本システムによって許容条件, 工程順, 汚染・物質に関するミスは減少し, エキスパートはいっそう高度な検討を行えるようになった。

理したものを図7に示す。本システム適用前は, 工程順・汚染などに関する指摘が大部分で, 100工程当たり4.8件であった。適用後は, 本システムによってこれらのミスが摘出されるため, 100工程当たり1.5件に減少した。その結果, エキスパートは, 「目標の構造・特性を実現するための最適条件は何か」というような, より高い見地からの検討が可能となり, これらに関する指摘が100工程当たり4.3件に増加している。また, 従来見逃していた問題点も検討する余裕ができたことが分かる。これらは, プロセス仕様の質的向上につながっている。

しかし, 上述したように本システムはエキスパートを不要にするものではない。本システムでは蓄積された知識のうち重要で頻度の高いものをルール化している。したがって, まれに起こるミスや新たな知識に関したミスをチェックすることはできない。これらについてはエキスパートがチェックし, 重要なものはそのつどルール化する方式で対処するのが適切であると考ええる。

本システムは, 16M DRAM相当のプロセス仕様を, 約40秒 (CPU: Central Processing Unitタイム, M680使用) と非常に短時間で診断できる。従来のエキスパートによるチェックでは, 1時間以上も要しており, プロセス仕様設計の効率化に大きく寄与している。

残された問題点としてはルールのメンテナンスが挙げられる。LSIプロセスは急速に進歩しており, プロセスの知識も変化している。したがって, ルールの追加・修正を頻繁に行う必要がある。この容易化, 自動化が今後の課題である。

## 5 結 言

LSI製造プロセス仕様の設計を支援するプロセス仕様診断システムについて述べた。本システムはプロセスの知識を用い

て, 設計したプロセス仕様を診断し, 仕様のミス, 疑問点を指摘するものである。本システムでは専門知識が必要で, その専門知識が明確であり, かつ日常的に必要な問題を見だし, その問題に適した診断方式を工夫した。これによって有効なシステムを開発でき, プロセス仕様設計の効率と質の向上に寄与している。

LSI製造プロセスには, 処理条件の決定, 不良の診断, スケジュール作成, 装置の故障診断など多くの面で多数の知識が存在する。これらの知識を有効に活用していくことが, 開発競争, 生産競争に打ち勝つかぎであり, LSIプロセスへのエキスパートシステムの応用は, 今後急激に増大するものと考えられる。

## 参考文献

- 1) B.K.Reid, et al.: Wafer Fabrication and Process Automation Research at Stanford University, Solid State Technology, July 1984 p.126
- 2) H.Komiya: Automated IC Manufacturing, Proc.VLSI Workshop on Manufacturing Technology, p.59(1987)
- 3) K.Ishikawa: Engineering of Manufacturing Automation, ibid., p.73
- 4) 「究極のLSI工場」構築に向けて本格的な検討が始まったCIM, 日経マイクロデバイス, 1986.8 p.67
- 5) 栗原, 外: 知識ベースに基づく半導体プロセス診断方式, 情報処理学会誌, 27, p.541(1986)
- 6) 福井, 外: 半導体プロセススケジューリングシステム, 電子通信学会技術研究報告, CAS 86-84
- 7) D.Gardner, et al.: Advanced Automation Techniques for Semiconductor Manufacturing Equipment, Extended Abstract of ECS Fall Meeting, Abstract No. 650(1987)
- 8) K.K.Lin, et al.: Recipe Generator for LPCVD Polysilicon, ibid., Abstract No. 653(1987)
- 9) S.B.Dolins, et al.: Monitoring and Diagnosis of Plasma Etch Process, IEEE Semiconductor Manufacturing, 1 p.23 (1988)
- 10) M.F.Klein: A Structured Methodology for IC Photolithography Synthesis in Semiconductor Manufacturing, ibid., p.28
- 11) 船越, 外: LSI製造プロセスフローの診断エキスパートシステム, 電子情報通信学会予稿集, C-213(1988-3)
- 12) K.Funakoshi, et al.: Computer Aided Research Automation System for Advanced VLSI, '83 Symposium on VLSI Technology, 5-8(1983)



# 論文抄録

## 知識工学を用いた鉄鋼加熱炉 燃焼制御

川崎製鉄株式会社 新田純三・前田一郎・  
日立製作所 谷藤真也・諸岡泰男  
電気学会論文誌 107-8  
758～764(昭62-8)

機能変更に柔軟に対応できる知識工学  
応用鉄鋼加熱炉制御システムを開発し  
た。

本システムは、炉の燃焼状態を管理・  
制御する制御系と、制御系に操業方針を  
指示する知識処理系から成る。知識処理  
系は、操業ノウハウを、プロダクショ  
ンルールと数式モデルの組みで表し、記憶  
する。数式モデルは制御目標や制約条件  
を表すもので、制御系の状態量と知識処  
理系のルールをつなぐ役割を果たす。

生産ピッチや加熱条件が変更されると、  
制御系は知識処理系に制御方針を問い合  
わせる。このとき知識処理系はルールを  
用いた推論により、数式モデルの選択、  
そのモデルの中のパラメータの選択を行  
う。制御系は、以後その推論結果を満足  
するように制御を進める。

加熱炉実機実験を行い、機能変更に対  
する柔軟性と制御のリアルタイム性を両  
立できることを確認した。

## 集積センサによる化学物質 およびその官能基識別

日立製作所 大石知司・兼安昌美・他1名  
電子情報通信学会論文誌C  
J71-C, 3, 385～390(昭63-3)

においセンサの開発を目的として、酸化  
亜鉛、酸化スズ及び酸化タングステ  
ンの3素子を使用した集積センサを作製  
した。本センサを用い、アルコール系、  
エステル系、ケトン系、ベンゼン系、及  
び炭化水素系に属す15種の化学物質につ  
いての、パターン認識によるその識別の可  
能性を検討した。その結果、次の結論を  
得た。(1) 15種すべての物質の検知パター  
ンは異なり、識別が可能である。(2) 共通  
官能基を持つ物質の検知パターンは類似  
している。(3) 3種素子の検知感度を3次  
元空間上に展開すると、共通官能基を持  
つ物質は特異的な閉鎖空間を形成する。  
すなわち、本センサを用い化学物質の官  
能基の識別が可能である。

## Common Lisp用最適化 コンパイラの設計と試作

日立製作所 安村通晃・高田綾子・他1名  
情報処理学会論文誌 28-11  
1169～1176(昭62-11)

はん(汎)用大形機上で動く Common  
Lispの最適化コンパイラを設計・試作し  
た。

HiLISPコンパイラは、高速性と移植性  
を考慮して仮想Lispマシン語である  
Lcodeを中間語として生成する。最適化の  
方式として、関数呼出しの最適化、型判  
定の最適化、局所最適化の各々の課題に  
対し、自己再帰展開、コンパイル時の型  
判定・型推定、パイプラインを意識した  
命令列並べ替えなどの方式を設計・試作  
した。

試作したHiLISPコンパイラに対して、  
Lispコンテスト代表12題ベンチマークに  
より各最適化項目の性能を評価した。こ  
の結果、組込み関数展開の効果が最も大  
きく、次いで型判定・型推定の効果が大  
きいことが分かった。再帰関数展開、命  
令列並べ替えなどの効果も確認できた。  
ここで提案する最適化方式は、Lisp(特に  
Common Lisp)のコンパイラに有効な方  
式である。