

TR-0832

第五世代コンピュータプロジェクトの概観
－研究開発成果と評価－

黒住 恭司

February, 1993

© 1993, ICOT

ICOT

Mita Kokusai Bldg. 21F
4-28 Mita 1-Chome
Minato-ku Tokyo 108 Japan

(03)3456-3191～5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

第五世代コンピュータプロジェクトの概観

－研究開発成果と評価－

(財) 新世代コンピュータ技術開発機構

研究所次長 黒住 恭司

I. まえがき

第五世代コンピュータとは、ロジックプログラミング技術に基づく並列処理と推論処理を基本メカニズムとする知識情報処理指向のコンピュータである。第五世代コンピュータプロジェクトは、この第五世代コンピュータの技術体系を確立することを目的とした通商産業省の基礎研究プロジェクトであり、1982年度から実施されて来て、1992年度末に終了する。

本報告は、本プロジェクトの発足経緯と目的、プロジェクト遂行にかかわるICOTの活動と関連機関との関係、プロジェクト全期間における研究開発推移、研究開発成果の概要およびプロジェクトの運営や成果に対する評価を紹介するものである。なお、プロジェクトの評価については、通産省主催の本プロジェクトに関する委員会報告(中間)における評価、海外専門家へのアンケート結果、およびFGCS'92における評価ワークショップ等の論議結果をベースとしてまとめた。

II. FGCSプロジェクト発足までの経緯と目標設定

1. 発足までの経緯

第五世代コンピュータプロジェクトは、(財)新世代コンピュータ技術開発機構(以下ICOTと略す)を中核研究機関として1982年以降実施され、1992年6月のFGCS国際会議'92で最終的な成果発表を行う等、現在最終段階を迎えている。本プロジェクトは通商産業省(以下通産省と略す)の情報化政策の一環として行われたナショナルプロジェクトであるが、その開発目標および開発成果の先端性や、科学技術の発展のための国際貢献を目指したプロジェクトの運営等、今後のナショナルプロジ

ェクトのモデルとなり得るいくつかの特徴を有している。このことから第五世代コンピュータプロジェクトに関する本報告は、技術目標と成果の説明の他、プロジェクトの設定、運営等を含めたなるべく幅広い視点での説明とする。

従来の情報化関連のナショナルプロジェクトは、それぞれの時代の日本の技術力や産業界の国際競争力を反映した目的設定や運営がなされた。第3世代のコンピュータの出現を背景としてコンピュータに関する技術水準の向上等を目指した超高性能電子計算機開発プロジェクト

(1966年から6年間で約101億円の開発費)、情報処理産業の高度化や国際競争力強化等を旨とした、パターン情報処理システム開発プロジェクト(1971年からの10年間で約219億円の開発費)が実施された。又、1971年7月にコンピュータの自由化措置の決定を受けコンピュータ産業基盤強化の政策として、電子計算機新機種開発プロジェクト(1972年から5年間で約571億円の開発費(補助率50%))や超LSI技術研究開発プロジェクト(1976年から4年間で約291億円の開発費(補助率50%))等が実施された。このような政策や産業界の努力の結果、1970年代の終り頃には、日本のコンピュータ技術、特に商用コンピュータのハードウェア関連技術については、欧米先進国に追いついたと考えられる状況に至っていた。

このことから、コンピュータ技術に関する日本のナショナルプロジェクトの役割としては、従来の「欧米の最新技術に対するキャッチアップによる国際競争力向上」から「世界に先駆けでのリスクの多い先端技術開発の実施による世界のコンピュータ科学への貢献」へと転換が論議されていた。又、商用コンピュータとしては

3. 5世代機と呼ばれるコンピュータが発表され、第4世代機の登場が予測されていた。

このような時代的背景のもとで、通産省は将来のコンピュータ技術を研究開発する新しいプロジェクトの検討を1978年に開始し、1979年には第五世代コンピュータ調査研究委員会（以下調査委と略す）を発足させ、1981年までの3年間調査検討を行った。この第五世代コンピュータのネーミングには、第4世代機より更に先行した先端技術開発に向けた通産省の意気が込められたと言える。

一方、電子技術総合研究所（以下電総研と略す）においては、一博パターン情報部長（当時、現在はICOT研究所長）を中心とするグループが、アーキテクチャ・人工知能・ソフトウェア工学・データベースの各技術を論理プログラミングを中核とすることにより新たなコンピュータの構図として統一的に組み合わせることができ、これは従来の逐次に手続き型処理をする「ノイマン方式」に対する非ノイマン型の「並列推論方式」として新たなパラダイムに成り得ると構想していた。

調査委は、親委員会（委員長は元岡達 東大教授（当時））とコンピュータアーキテクチャ、基礎理論、システム技術（当初は社会環境）の各研究分科会から構成され、委員会・分科会には大学・国公立研究機関・コンピュータメカ等の研究者百数十人が委員として参加し、3年間で百数十回の会議が開催された。そこではまず、近未来の重要なコンピュータ技術として、非ノイマン型の革新的コンピュータ技術を主張する基礎理論研究分科会（主査は一博）とノイマン方式の極限までの探求を主張するアーキテクチャ研究分科会の意見による以下に示す候補が議論された。

- 知識処理指向の推論コンピュータ技術
- 大規模データベース・知識ベース向きのコンピュータ技術
- 高性能ワークステーション技術
- 機能分散型コンピュータ技術
- 大規模科学計算向きのスーパーコンピュータ技術

これらの会議を通じて、しだいに前述の電総研の一博グループが構想していた非ノイマン型方

式が委員に理解されて行った。調査委は1980年末には、将来技術としての重要性、社会的ニーズとの結び付きおよび日本のナショナルプロジェクトとしてのオリジナルな先端技術開発を通しての国際貢献の観点等に基づき、現在言われている第五世代コンピュータ像を結論付けた。調査委はその後、更に技術的観点、社会的インパクト、プロジェクトの枠組への検討を継続し、その調査結果を第五世代コンピュータプロジェクトの提案としてまとめた。

調査委の提案は、1981年10月開催のF GCS（Fifth Generation Computer Systems の略）国際会議^{1）}81において発表され、日本が革新的なコンピュータの開発を計画したと世界に衝撃を与え、種々の反応を引き起した。この国際会議での反響や日本の創造的自主技術開発や国際貢献への意義への考慮等により、本プロジェクトは発足が認められ、1982年4月にICOTがプロジェクト実施の中核機関として設立され、同年6月に研究開発を開始した。

2. プロジェクトの目標の設定

本プロジェクトの開発目標の設定については、従来のキャッチアップ型と異なり「第五世代コンピュータ像」としての開発方向のみを当初設定し、開発結果から次の目標を設定して進む「目標探索型プロジェクト」方式による合理的運用を目指した。この開発方向の出発点となる調査委の提案を要約して次に示す。

- ① プロジェクトの目的：知識情報処理を指向し、現存の方式でのコンピュータの技術的限界に対処しうる革新的コンピュータ、即ち並列処理と知識ベースを用いる推論処理を基本メカニズムとする図1に示す第五世代コンピュータの技術体系を確立する。
- ② 第五世代コンピュータ像：「論理的推論」を基本メカニズムとし、ハードウェアとソフトウェアのインタフェースに論理プログラミング言語（基本的な処理は三段論法）を採用し、かつ実用的な知識情報処理に必要な強力な記号処理（推論の基本は記号処理）能力を大規模並列処理により実現するコンピュータ。第五世代コンピュータと従来のノイマン方式のコンピュータとの比較を次に示す。

- 知識情報処理 ↔ 数値計算・データ処理
 - 論理プログラミン ↔ 手続き型
ミシング言語 (マシン) 言語
 - 並列処理 ↔ 逐次処理
- ③ プロジェクトの研究開発目標：五世代コンピュータのハードウェアおよびソフトウェアの技術を1セットとして研究開発する。そのための第五世代コンピュータプロトタイプシステムとして1000台規模の要素プロセッサから成る100MLIPS（LIPSは1秒間の推論実行回数）から1GLIPSの性能を目指す。
- ④ プロジェクトの研究開発期間：前期（要素技術開発）、中期（サブシステム開発）、後期（トータル（プロトタイプ）システム開発）の3段階に区分された10年間と見積る。

3. 設定目標の意義

本プロジェクトの目標とその意義に関して、社会的要請や政策的観点での評価を次に示す。

- ① 本プロジェクトは独自の創造的技術開発力の向上を図り、欧米依存でない自主技術を開発し、それによるコンピュータ科学の発展を通じて国際貢献をすることを目指し、かつ後述のように国際貢献してきた。又、海外アンケートでは、「目標とする技術」について、約80%の人が「先駆的」と評価した。
- ② 国際的に共通に利用できる競争段階以前（Pre-competitive）の技術の開発を当初から目標とし、かつ国際的に実績が認知されたことにより、今後のナショナルプロジェクトのひな型となった。
- ③ 本プロジェクトの構想発表と実施に触発され、海外においても、知識処理分野の研究コミュニティが発生/活性化し、又類似のコンピュータプロジェクトや共同研究機関が発足した。プロジェクトとしては米国の戦略的コンピューティング計画（SCITと略す、1984年開始）、ECのESPRIT計画（1984年開始）、英国の高度情報技術開発計画（AITEと略す、通称はAlveyプロジェクト、1984年開始）がある。共同研究機関としては、米国のMCC、欧州のECRCやSICSがある。これは日本のプロジェ

クト構想が世界に大きな影響を与えた初めての例であり、評価を反映している。

- ④ 海外アンケートは、欧米の研究者や専門家に対し322通発送し、102通の回答を得た。回答者のプロフィールは、ほとんどすべてが本プロジェクトを知っており、同じ研究開発分野で、かなり活動（23%）、少し活動（37%）、異なる（40%）である。回答結果全体を通じての特徴は本プロジェクトに対する非常に高い関心と研究開発成果へ高い評価を行い、かつ今後の展開に大きな期待を抱いていることである。本プロジェクトの目標設定に関するアンケート項目の結果では、分野の広さは適切が63%、方向・先駆性は適切で独自性があるが各々約80%であり、設定目標として十分適切であると評価された。

III. FGCSプロジェクトの推移

1. FGCSプロジェクトの研究開発ステップ・予算および各ステップにおける研究開発課題の設定

本プロジェクトはリスクで先端的な技術開発を行うため、長期間（10年）の計画とし、中間的研究開発成果を判断し、次の研究開発目標と計画の詳細を定めて行く目標探索方式のため、前・中・後期の3段階に分けて進めた。

- 前期は1982年度から1984年度までの3年間で、第五世代コンピュータに必要な要素技術に分けて、基礎技術を研究開発した。
- 中期は1985年度から1988年度までの4年間で、小中規模の実験的サブシステムを研究開発した。
- 後期は1989年度から1992年度までの4年間で、トータルシステムとしてのプロトタイプシステムを研究開発した。これは当初計画に対し、統合化・評価・改良を行うための1992年度が追加されたものである。

研究開発を実施するための費用は、全額国の予算である。各年度毎の予算は前年度に研究開発計画を実施するために必要な経費の見積りに基づいた予算要求に対して審議され、定められて来た。各年度の研究開発計画は、各期の研究開発課題毎の目標を年度毎の開発線表に基づき年度作業に展開し、定めて来た。その結果、予

算は前期約80億円、中期約220億円、後期約240億円の総額約540億円であった。

参考として日本のプロジェクトはⅡ. 1節で説明したとおりであり、海外プロジェクトではESPRIT(1984年から1992年までのフェーズⅠとⅡ)は47億ECU(1ECUは約1.2米ドル)、SCI(1984年から10年間計画)は約10億米ドル、AIT(1984年から5年間)は約3.5億ポンドである。

研究開発課題と目標は前・中・後期の各期毎にその前の期の研究開発成果や必要と考えられる研究テーマを検討し、テーマを絞り込みつつ設定して来た。まず前期開始に当り、調査委提案の5グループ10課題(表1に示す)を基として、前期テーマをハードウェア・基礎ソフトウェア・ソフトウェア開発用パイロットモデルの3グループ9課題(表1)と設定した。

前期終了時点では機械翻訳および音声・図形・画像認識の基礎研究や汎用マシン上でのPrologベースの知識利用実験システムの開発について、民間での開発機運が高まったことなどから、民間の自主研究に委ねることとし、プロジェクトの対象から外した。

この結果、中期では小～中規模の並列システムの構成方式研究と部分システム実装技術の開発、並列論理型言語に関する研究と処理系等の開発、並列ソフトウェアとしてOS中核部の実現技術を中心とした開発および前期に開発した逐次論理型言語ESPベースでの基礎的ソフトウェア技術の研究開発を行うこととし、3グループ10課題(表1)を設定した。

中期の途中段階では、大規模電子化辞書の開発を、基盤技術促進センタが出資する日本電子化辞書研究所(EDR)が進めることとなり、又逐次論理型言語のESP(Extended Self-Contained Prolog)の汎用(UNIX)マシンに対する移植を同様の形態組織のAI言語研究所(AIR)が進めることとなった。

後期における研究開発目標は、それまでに得られた種々の技術を統合し、本プロジェクトの目的である推論処理および並列処理を中核技術とする第五世代コンピュータのプロトタイプシステムを実現し、統合的評価・改良を行うことである。このため、逐次ベースの各種研究開発

は民間の自主研究に委ね、並列処理の研究開発に絞ることとした。

この結果、ハードウェアとしては、並列論理プログラミング言語である核言語第1版(KL1)に基づく並列アーキテクチャーにより、知識を用いた高速な推論処理を実現する大規模な並列推論マシン(PIM:Parallel Inference Machine)を開発することとした。ソフトウェアとしては、PIMを効率良く制御する機能や知識ベースを柔軟に管理する機能および知識処理のための種々の実験的機能を持つソフトウェア群をKL1を適用して開発し、並列推論技術の検証および並列知識処理技術への挑戦を行うこととした。ソフトウェアの課題は、次に示す技術の開拓を目標として、設定した。

- 大規模並列ソフトウェア作成技術：問題の並列モデル化を行う技術、並列プログラミングのパラダイムの考案・収集および並列に処理するアルゴリズムの開発。
- 知的システム構築技術(知識処理技術)：高性能の推論(記号)処理能力を知的処理レベルの向上に転換するための技術として、より高い機能を持つ推論エンジンや記述レベルの高いプログラミング言語の研究および知識記述方法や記述された知識管理方法等の開発。

2. 研究開発実施体制

本プロジェクトの実施体制は、以下の事項を考慮して集中研究所方式と決定され、プロジェクト遂行の中核非営利研究組織として、ICOTが設立され、その後図2に示す体制でプロジェクトを推進して来た。

- プロジェクトの開始当初、知識情報処理や並列推論処理という先端分野の研究者は日本にはわずかであり、人材を迅速かつ効率よく育成しつつ独創的な研究を遂行する形態が必要。
- 長期に渡って研究の一貫性を保ち、テーマ選択や指導を統一的枠組で行うため、研究リーダーの強力な指導性を発揮できる形態が必要。
- 外部の組織や研究者と研究交流や協力を密接に行うための中核となる組織が必要なこと。

ICOTは事務局と研究所から成り、研究所の研究者は創造的研究を行う必要性等から、若手(35才以下)中心に集められ、主に3～4

年で交代して来た。現在までに延べ約190人の研究者が平均4年弱の期間で出向し、研究者の平均年齢はおおむね30才を維持し、人材の育成や組織の活力維持を適切に行った。又出向者が再び企業に戻るにより技術の普及を効果的に行った。一方、中核となる研究者が10年前後の長期間に在職したことにより、研究者の交代にもかかわらず研究の一貫性や高い研究遂行能力を維持できた。研究者数は発足当初は40人、中期初年度は64人、中期後半から後期は約90～100人で、研究者は国立研究機関（電総研等）、中立的な研究機関（NTT等）、民間企業からの出向であるが、出向元組織数はオープン性や技術の普及のため、中期においてICOT賛助会社からの出向を受け入れたことにより、当初の11から19に増加して来た。

研究所組織は、前期は研究計画部と3研究室であった。研究室については、中期には5研究室に、後期2年間に1研究部7研究室になり1992年10月から1研究部2研究室へと変更した。この変更や研究室のテーマ分担の変更は研究進捗に合わせた研究テーマの状況やリードとなる人材の状況に合わせて行われて来た。

研究交流の一環として、毎年数名の海外研究者を数週間招聘し、特定の研究テーマでICOT研究者と意見交換を行って来ており、11年間で、延べ86名を12ヶ国から招聘した。

又、8名の長期（約1年間）派遣の研究者を外国政府機関との覚書きに基づき受入れた他、科学技術庁のフェローシップ制度による研究者（1名）を受入れた。この覚書きは米国国立科学財団（NSF:National Science Foundation）、仏国の国立研究所（INRIA:Institut National de Recherche en Informatique et Automatique）、英国貿易産業省（DTI:Department of Trade and Industry）と締結した。

通産省は、本プロジェクトの実施をICOTに毎年度委託し研究開発費用を全額負担して来た。そのため、通産省は電子計算機基礎技術開発推進委員会（以下推進委と略す）を設置し、有識者による研究開発計画や成果の評価についてのアドバイスを受けて来た。

ICOTは中核的研究開発を行い、ハードウェアの開発・製造やソフトウェアの開発等の開

発的作業についてはコンピュータメーカ等に再委託契約をして依頼して来た。

この他、ICOTは委員会やワーキンググループ（WG）を設置し、大学や研究機関の研究指導者・研究者と全体的又は特定テーマ毎の計画や成果についての意見交換を行って来た。このWGも研究進捗に合わせて変更して来たが、全体で毎年200人前後の委員に協力頂いた。

3. 研究開発環境の設定

本プロジェクトは、ソフトウェアとハードウェアの各々のテーマについての研究が相互に密接に結びつく様、組織や開発ツールの設定をして来た。ソフトウェア開発環境、特にプログラム言語を統一したことは、本プロジェクト運営上の大きな特徴であり、アイデアやソフトウェアを共用できると共に、それらの比較・評価や統合を行う上で極めて有効であった。又、開発環境となるハードウェアおよびソフトウェアを研究の一環で開発し、それを次の段階でツールとして利用しつつ評価・改良を行い、更に新たな研究に結びつけることを繰り返して、研究の一貫性や効率性を保った。前・中・後期の研究開発環境・言語（表2）を次に要約して示す。

- 前期：Prolog（DBC2060上）
- 中期：前期開発成果の逐次型推論マシンPSI（Personal Sequential Inference Machine）とそのオペレーティングシステムSIMP（Sequential Inference Machine Programming Operating System）および逐次論理型言語ESP
- 後期：マルチPSI（又はPIM）とそのオペレーティングシステムPIMOS（Parallel Inference Machine Operating System）および並列論理型言語KLI

汎用機を前期はProlog処理系の走行マシンとして、中期以降はメール等の通信やシミュレーション用に使用した。

PSIを中期以降のソフトウェア開発用のワークステーション（WS）として使用したが、Ⅱ.1節で説明するように前期にまずPSI-Iとして開発した後、中期にはPSI-IIとして、後期にはPSI-IIIとして、順次後継モデルを開発した。PSI-IはESP用のソフトウェア開発用ワークステー

ョンとして約100台を中期前半に導入・利用した。PSI-IIは逐次形のESPの他擬似マルチPSIとして並列形のKL1を走行させることができることから、中期後半におけるソフトウェア開発の主力WSとして約300台を導入・利用した。更にPSI-IIIは推論マシン機能の他UNIX機能を利用できることとし、後期において約100台を導入し、PSI-IIと併用した。

並列ソフトウェア環境としては1987年度のマルチPSI(V2)1号機の開発後並列ソフトウェア開発環境用に順次追加し、約7セットを利用した。その後PIMの開発と共にPIMも開発用に投入した。マルチPSIは、主にICOTに設置され、再委託先や海外の共同研究機関からネットワーク経由で利用した他、小規模の16~32プロセッサ構成を再委託先に設置した。

ネットワークも開発環境として重要であり、現在は構内接続はLAN(イーサタイプ)を、国内・海外接続は専用線接続のTCP/IPネットワークにより行っている。

4. 研究開発成果の公開・普及と国際交流活動

世界のコンピュータ科学分野への貢献を重要な要素と位置付けて、図3に示すように、研究開発の成果のみならず、研究のアイデアや過程についても論文や資料を通じて公表・説明を行うこと、および外部の研究者や機関との積極的研究交流への多大な努力を続けて来た。

この努力により、並列処理や知識情報処理技術の進歩へ貢献し、更にこの分野の研究コミュニティを拡大して来たと内外から評価された。

他方、ICOT研究者との意見交換等を通じて、本プロジェクトは多数の外部研究者から多大な貢献を受けて来た。例えば、並列論理型言語の母体であるGHC(Guarded Horn Clauses)はParlogやCP(Concurrent Prolog)の研究者との交流の結果生まれておりハードウェアシステム(PSI等)の性能改善はWAM(Warren Abstract Machine)命令セットの導入効果が大きく寄与している。

① ICOTジャーナルと研究資料の出版・配布を通じて研究活動と成果を公表している。季刊でICOT活動と研究資料の紹介するICOTジャーナルを海外35ヶ国約600ヶ

所に配布してきた。研究資料には、研究論文(TR)と研究メモ(TM)があり、11年間に約800のTRと約1200のTMを発刊した。これ等の約1/3は英語版であり、海外約30ヶ所に定期送付すると共に要望に応じて個別に配布してきた。

② ICOT研究者が外部研究者と意見交換や研究討論を行う次の様な機会がある。

- 国内外の学会・ワークショップ等で論文発表(約450回の国際会議等での発表、約1800回の国内学会等での発表)や意見交換を行った。又、多くの海外研究機関を訪問し、ICOT活動の紹介や研究交流を行った。

- 毎年150~300人程度の研究者や専門家等のICOT訪問を受け入れ、ICOT活動の紹介や意見交換等を行ってきた。

- 前節で述べた様に、研究者の招聘や海外政府機関からの派遣研究者の受け入れを行って来た。派遣研究者の受け入れは中期に入って開始され、その研究成果は覚書きによる公開原則に従い論文として発表されている。

③ ICOTは種々のシンポジウム(毎年の成果発表会や国内のロジックプログラミングコンファレンス)やワークショップ(WS)を開催し、研究成果や活動状況の発表や意見交換を行って来た。

- FGCS国際会議'81に引き続き、前期の成果をFGCS国際会議'84(1984年11月開催)で、中期の成果をFGCS国際会議'88(1988年11月開催)で、後期の最終的な成果をFGCS国際会議'92(1992年6月開催)で発表した。

- 国別シンポジウム等を次の通り開催した。

- ・1983年以降、日瑞(又は日瑞伊)WSを7回開催(スウェーデンコンピュータ科学研究所(SICS)、伊ピサ大学と共催)

- ・1986年以降、日仏AIシンポジウムを4回開催(仏国INRIAと共催)

- ・1987年以降、日米AIシンポジウムを4回開催(NSFと共催)

- ・1989年以降、日英WSを2回開催(英国産業貿易省(DTI)と共催)

④ 論理プログラミング分野での研究交流の一環として、米国アルゴンヌ国立研究所(AN

L)、米国国立衛生研究所(NIH)、米国ローレンスパークレイ研究所(LBL)、スウェーデンのSICS、オーストラリア国立大学(ANU)と共同研究を行ってきた。

⑤ 本プロジェクトは基礎的かつ先端的な研究開発を行うものであり、国際貢献の観点からも、本来その成果を国内外を問わず広く世の中に普及させる方策が必要である。しかし、本プロジェクトの研究開発は、国からの委託契約に基づき全額国の負担で行われたことから、工業技術院が特許等の知的所有権(IPR)を工業所有権等として管理し、利用を希望する企業に対して有償で差別なく許諾することとなっている。プロジェクトの中間段階においては、企業が利用許諾を受けPSIやSIMPOSを商用化し、販売を行うことにより技術の普及にも貢献して来た。

⑥ 中期以降技術普及の方策として、ICOTは研究開発中の20種以上のソフトウェアを研究開発ツールとして、営利目的以外の研究利用に対して無償で貸与を行ってきた。

⑦ 一方、プロジェクトで開発されたソフトウェアが国有の工業所有権等として管理された場合には、試験研究目的の利用においても、有償での許諾手続きが必要な枠組となっている。しかし、米国を中心として欧米における研究レベルのソフトウェアについては、まず普及させることを目的として無償で配布を行うパブリック・ドメイン(又はフリー)ソフトウェア化が進んでいる。

特に本プロジェクトにおいて、基礎的・先端的なソフトウェアがプリコンティティブな研究開発段階のものとして作成されており、多数の研究者がこれらのソフトウェアを利用することにより、これらのソフトウェア自体への改良や新たなソフトウェア開発が行われる等により、このプロジェクトで開発した技術の効果的な普及・発展が進むものである。このような考え方に基づき、並列記号処理や知識処理のための基礎的かつ先端的な研究開発段階のものとして作成されたソフトウェアについては、ICOTがその著作権を有し、ICOTは「ICOT無償公開ソフトウェア」(以下IFSと略す)として、利用に関する一切の制約条件なし(使用・

変更・複製・配布は自由、但し無保証)で公開し無償で配布を行うことをFGCS国際会議'92において通産省が発表した。現在71本のIFSをTCP/IPネットワーク上のICOTのFTPサーバに格納しており、ファイル転送により国内外から自由にアクセスできる。IFSの分野別内訳では、記号処理は8本、知識処理のうち知識表現・知識ベース・制約処理が13本、問題解決・定理証明が11本、自然言語処理が19本、応用実験は20本である。又記述言語は、KLIが36本、ESP系(Common ESPを含む)が25本、他はC又はProlog系である。プログラム総量は300万行以上である。実際には1992年8月から配布を開始し、約4ヶ月間で28ヶ国から総計約800名、平均5本/名のアクセスがあった。国別では日本約210名、米国190名、英・独・仏・加・豪・瑞の各国が約20~30名であり、欧米のIFSへの興味の高さを示している。一方、IFSは研究ツールとして即ちに使用するためのものでなく、学術的な観点の性格が強く、又KLI記述について自分達のマシンでも動作できるようにして欲しいとの要望が多くでている。

5. 社会的・政策的評価

推進委中間報告や海外アンケート結果等に基づき実施体制、成果の普及・公開、国際貢献等の観点からの社会・政策面の評価を述べる。

研究開発実施体制については、

- 当初わずかであった本分野における研究者を多く育成したこと、
- 研究テーマの適切な絞り込みや研究開発環境や開発言語の統一等を行い、予算・人員の効率化を図りつつ本プロジェクトの全体的目標の達成したこと、

極めて効率的・効果的なものであったと中間報告で評価されている。これは海外アンケート結果においても、プロジェクトの期間は適切が58%、短い29%で、規模は適切が70%で、ICOTの人員規模は適切が84%で、テーマの絞り込みは適切が81%の意見であることから、実施面はおおむね適切と評価された。

成果の普及・公開については海外アンケートで、技術の学会への論文等での公開や現在の公

開方法は適切、普及の努力は、十分又はまあまあ
の回答が各々80%程度であることから前節
で述べた実績が高い評価を受けた。この海外ア
ンケートはFGCS'92において発表された
ソフトウェアの無償公開前であるが、ソフトウ
ェア公開は必要が89%であった。又、FGC
S'92参加者や評価ワークショップ参加者か
らソフトウェア無償公開について、プロジェク
トの公開性をアピールできたこと、成果普及の
強力な手法であることおよび計算機科学への貢
献の面で強い賛同の意見を多く受けた。

国際貢献については、オープンな国際交流と
開発した基礎技術の国際公共財としての積極的
な公開を通じて計算機科学の発展に寄与するこ
とを基本方針として実施して来たことを高く評
価された。国際交流を研究成果の蓄積に合わせ
てしだいに発展させて行くとの方針通りに実施
して来た。その内容をステップ別に発展形態を
整理して、次に示す。

- 前期：論文発表、研究者の相互訪問、海外研
究者の招聘による研究者個人ベースの交流。
- 中期：海外国公立機関を窓口として、ワーク
ショップ共催や長期派遣研究員受入れ等。
- 後期：ICOTで開発したツールの評価を兼ね
て、ツール提供による国際共同研究。

この国際交流は、個々の研究レベルの信頼関
係をベースとして発展する草の根型と、組織間
の交流については自らの経費は自国が負担する
という両岸方式が特徴である。

海外アンケートでの計算機科学への成果普及
実績は、おおいに(35%)、やや(62%)の意
見であり、又評価ワークショップ等で、ICOT
は国際交流を通じて、論理プログラミング、
並列処理および知識処理分野での研究交流拠点
であったと評価され、又今後においてもこの努
力を継続すべきとの多くの意見を受けた。

IV. FGCSプロジェクトの研究開発成果

開発ステップ毎にどの様に成果が推移し、最
終的なプロトタイプシステムを構成する技術と
してどう統合したのか、又その技術的特徴・価
値は何かについて本章で述べる。成果の分類を
並列記号処理技術、知識情報処理技術および実
践的な検証のための応用システムに分ける。

1. 並列記号処理技術に関する成果の推移

(1) 逐次記号処理技術について

記号処理技術のうち、まず前・中期における
逐次記号処理技術についての研究開発成果の推
移を図4に示し、その概要を以下に述べる。

前期において、まず大型汎用機並みの性能を
持ち、推論処理に適したソフトウェア開発環境
のためのツールを開発すること、その開発を通
して論理プログラミング言語の適用性を実験す
ることを目的として言語・ハードウェア・オペ
レーティングシステム(OS)の1セットから
成る逐次型推論システムを開発することとした。
調査委の報告では、第五世代コンピュータのハ
ードウェア・ソフトウェアのインタフェースと
なる論理型言語を核言語(KL)と名付けてお
り、逐次型推論システムの場合は核言語第0版
(KL0)と呼ぶこととしていた。前期にまず
PrologをベースにKL0を設計し、次いでKL
0言語マシンとしてパーソナル逐次型推論マシ
ン(PSI-I)の1号機を1983年12月
に完成させた。PSI-Iは当時の大型機(DEC20)
上のProlog処理系と同等以上の35
KLIPSの推論性能を発揮した。OSや応用
プログラム等の大規模ソフトウェア開発のため
のモジュラープログラミング機能やマクロ記述
機能をKL0に付加したソフトウェア記述用言
語ESPを設計し、PSI用のオペレーティ
ングシステムSIMPOSをこのESP記述によ
り開発した。ワークステーション用のOSとし
ての必要機能をSIMPOSで実現した。前期
でのPSIおよびSIMPOSの開発により、
論理型言語記述により大規模ソフトウェアやそ
の代表であるOSを開発できることとその開発
効率の良さや表現能力の高さを実証的に示した。
この他、バックエンド型の逐次型推論マシン(CHI-I)
の試作により当時世界最高速である20
0KLIPSの性能を達成した。

中期において、まずPSIのCPUを小型化
し、このCPUを搭載したマルチPSI用FEP
(Front End Processor) 兼小型化PSI(PSI-
IIと呼ぶ)を開発した。なお、このCPUは
後述のマルチPSI(V2)用と共通である。
このPSI-IIは小型化とWAM命令セットの
採用等によりPSI-Iに比べ大幅な性能向上

である330K（その後改良し400K）LIPSを達成した。CH I - I も同様にCH I - IIとして小型化された。なお、PS I - IIの後継機PS I - IIIはPIMの1モデルであるPIM/mのCPUの実施許諾による推論部とUNIXマシンとを結合してメーカーが開発した。

SIMPOSについてもプロジェクト内での利用結果を反映した機能拡張やFEP機能の付加を行いつつ継続的に改良を行った。PS I およびSIMPOSはⅢ.3節で述べたように逐次（ESP）に加え並列（KL1）論理型言語用の開発環境を提供し、本プロジェクトの中・後期における主力WSとして利用された。

データベース／知識ベース（DB／KB）管理ソフトウェアとしては、前期に関係DB管理ソフトウェア（Kaiser）を試作した。次に中期において、自然言語処理や種々のエキスパートシステムにおける大規模DB／KB構築に必要な機能を持つ管理システムとしてKappa-I、次いでKappa-IIを開発した。Kappa-IおよびIIは非正規関係モデルに基づく演繹オブジェクト指向DB管理システムのためのデータベースエンジンである。

非正規型データベースは、レコード長が不規則でかつネスト構造を持つデータに対して処理できる特徴を有していることから、自然言語辞書や遺伝子データベースのKappaへの格納を行い、適していることを確認した。

(2) 並列記号処理技術に関する成果の推移

並列記号処理技術は言語の設計と実装、ハードウェアおよびその制御ソフトウェアの実現技術に分けることができ、その開発経緯を図5に示し、以下に説明する。

調査委報告では、第五世代コンピュータのハードウェアとソフトウェアのインタフェースとなる並列論理型言語を核言語第1版（KL1）としてまず設計し、種々の試作実験の後再設計し、プロトタイプシステム上では核言語第2版（KL2）とすることが計画であった。

この言語の設計が前期における重要な課題であった。KL1の設計方針は、逐次処理用の言語であるPROLOGを拡張することは、並列処理の指定方法等が複雑になり、不適であると判断し、

並列処理を自然に記述でき、同期と条件判断が一体化した機構をもつこととした。当時発表されていたPARLOGやCPの検討を行い、かつその設計者との研究交流を行った結果、1984年の終りに新たにGHCを提案した。

GHCのプログラムは、ガード付の節の集合である。論理のプロセス解釈によれば、ゴール（あるいはサブゴールの集合）はプロセスと見なすことができ、プロセス間の通信は共有変数を通じておこなわれるが、GHCのプロセス間で受け渡される結合は決定的である。この性質はOSのようなリアクティブシステムの記述には必須である。核言語の中核となる言語として、次にGHCのサブセットのFlat GHC (FGHC) を設計した。GHCやFGHCは、計算の正当性を保証するアトミックな操作を指定するのみで、実際にどのように分散して計算するかは自由であることから、並行論理型言語と言われる。実際のハードウェア上ではプロセッサの数は限定され、かつプロセッサ間の通信オーバーヘッドも大きいことから、核言語としては、この並行論理型機能に加えて、アトミックな操作をいつどこで行うかのマッピングを指定し、制御できることが必要である。KL1言語の大きな特徴は、FGHCをベースとする並行実行機能と優先度やプロセッサの指定を行うためのプラグマと呼ばれる制御機能を分離したことであり、前者をKL1-c (core)、後者をKL1-p (pragma) と名付けている。KL1-cはFGHCに実行の開始、中断、再開、放棄といった実行制御の単位となるゴールのグループを荘園として管理する機構やマクロ記述機能などを追加したものである。OSや応用プログラムはKL1 (cおよびp) で記述される。更にこのKL1の下位に、抽象マシン言語KL1-b (base) を設定し、並列マシン設計の基準としている。このKL1言語群は、その後言語としてのリファインメントを行ったが、KL1の名前のままとした。

この他の言語としては、オブジェクト指向言語のMumを設計し、その処理系の実験結果をKL1の改良に反映している。又、KL1でオブジェクト指向のプログラミングスタイルをとるプログラムを、簡潔に記述できるようにする目的で、AYAを設計し、処理系を開発した。

ハードウェアの研究開発としては、前期にデータフロー方式やリダクション方式に基づいた8～16台規模の実験用ハードウェアシミュレータやソフトウェアシミュレータを試作した。

中期において並列論理型言語のKL1の設計により、世界に例のない本格的な並列オペレーティングシステムとその開発の土台となる並列推論マシン実験機の開発を行うこととした。その設計においては、ハードウェア機能、KL1言語処理系および並列OSの各階層間の機能分担として開発上のリスクをソフトウェアが主に分担することとし、ハードウェアはソフトウェアの開発に適したワークベンチとして必要な機能、メモリ容量、プロセッサ台数、安定性、信頼性などを考慮した設計で、プロセッサはKL1実行に最適化した命令セット、命令実行のパイプライン化、タグアーキテクチャ等の記号処理向けの方式とした。並列推論マシン実験機としては、PSI-Iを6台ネットワーク接続した実験を経て、PSIのプロセッサを小型化した要素プロセッサと専用の接続ハードウェアを開発し、64台の要素プロセッサを2次元格子状に結合したマルチPSIシステム(V2)を開発した。このシステムはKL1の解釈実行ファームウェアの実装により、単一プロセッサで150KLIPS、システム当り約5MLIPSの並列処理能力を発揮した。

このマルチPSIシステム(後期の製造分を含め合計7システム)と並列推論マシン用のOS(PIMOS)は中期終盤から後期にかけての並列推論ソフトウェア開発の土台となった。

一方、知識ベースマシン(KBM)の研究開発としては、前期に4台の関係代数演算エンジン持つ関係DB実験機(Delta)を試作した。中期においては、比較・サーチ等のためのアクセレータをPSIに付加した演繹データベースシミュレータ、CHI上の多重-多重名前空間を持つDB実験システム、および単一化エンジンとマルチポートメモリからなる知識ベースハードウェアシミュレータを試作した。

本プロジェクトの最終目標である第五世代コンピュータプロトタイプハードウェアとしては、前・中期の並列記号処理に関する開発結果とその評価に基づき、中期後半から並列推論マシン

の設計条件の設定を進め、中期末までに基本的設計と、一部詳細設計を行った。

一方、知識ベース機能の実現については、前・中期のハードウェアやソフトウェアの開発結果とその評価から、プロトタイプシステムにおいては、ファイルシステムを持つ並列推論マシンPIMとその上の知識ベース管理ソフトウェアにより当初目的の実現を図ることとした。

並列推論マシンの構成方法として、

- 要素プロセッサ(PE)の命令セットの設計としてマイクロプログラム制御を用いるCISC型とバイト命令を持つRISC型
- プロセッサ間接続方式として2次元格子構造ネットワーク方式とプロセッサと共有メモリを共通バスで密結合したクラスタとクラスタ間ネットワーク接続による階層型接続方式の選択、更にはそのクラスタ間接続方式等を並列アーキテクチャ技術として種々実験し、更に応用プログラムにおける並列モデルやアルゴリズムとの適合性の実験を行うことを目的として、各々技術的特徴を持たせた5種類のモデルを開発することとした。

この5種類のモデルとしては、次に示すような大規模並列ソフトウェア開発環境となりうる大規模3モデルとアーキテクチャ実験目的のみの小規模2モデルとした。この大規模モデルは、単体PE当り300～500KLIPSの性能(システム性能は100MLIPS以上)とし、性能や信頼性確保のため最先端のサブミクロンレベルのVLSI技術を利用することや知識ベース格納用の大容量ディスク付加機能を持つこと等を設計目標とし、ほぼ目標どおり開発した。

- PIM/p: RISC型+マクロ命令セットのPE、8PEと256MB共有メモリで1クラスタ、最大64クラスタをダブルハイパーキューブ網(20MB/秒・リンク)により接続、最大512PE構成。
- PIM/m: CISC型水平マイクロ命令セット・80MBメモリのPE、最大256PEを2次元格子網(4.2MB/リンク)に接続、マルチPSIの後継機に相当。
- PIM/c: CISC型8PEと160MB共有メモリで1クラスタ、最大32クラスタのクロスバ網接続、最大256PE構成。

- PIM/k : 4PEで1ミニクラスタ、4ミニクラスタで1クラスタ構成による階層型キャッシュ方式の実験機。
- PIM/i : 8PEで1クラスタ、LIW (Long Instruction Word) 型の命令セットや放送型キャッシュ方式の実験機。

これらの各モデルは命令セットは異なるが、共通のKL1言語 (KL1-b) とPIMOSをサポートしている。そのためのKL1処理系としては、分散形処理系とクラスタ形処理系 (VPIM処理系) の2種類に分けて開発した。

並列OSの開発においては、汎用の知識処理や記号処理を目的とする大規模並列マシンにおけるOSの標準モデルとなり得るものとする 것을目標とした。まず並列OSの開発環境として汎用機上にKL1プログラミング環境PDSSを開発し、その上で並列OSの開発を進め、マルチPSIの完成と共にマルチPSI上に移植し、並列推論マシン用OS (PIMOS) 第1版として中期に稼働させた。PIMOSの機能のうち、資源管理や応用プログラムの実行管理機能は、マシンアーキテクチャとは独立し、かつ方式上制御可能なプロセッサ数を100万程度まで拡張できるよう設計されている。このため管理のボトルネックを生じないよう徹底した分散管理方式を採用したのが特徴である。このPIMOS第1版は並列OSとしての実行管理、資源管理機能、デバッグ支援機能等の基本機能を提供した。後期において、ネットワークアクセス、マルチユーザ管理、UNIX系端末との接続等の機能追加とプログラミング支援機能の拡張やPIMへの移植を順次行った。KL1プログラミング支援機能としてのツールには、デバッガ・トレーサ類の他、負荷分散を最適化するための並列処理状況をグラフィックに支援するツール (PARAGRAPH) 等がある。

又、データベース管理機能としては、中期開発のKappa-IIの評価をベースに、Kappa-IIと同様な非正規関係モデルに基づき、かつPIM上の分散DK上のDBを対象とした分散DB管理機能をもつ並列版のKappa (Kappa-P) を開発した。このKappa-Pは後述の知識表現言語Quixoteと

の組み合わせにより演繹オブジェクト指向DB/KB管理機能を提供している。

2. 知識情報処理技術に関する成果の推移

知識情報処理技術は、人間が用いている種々の知識をより直接的に表現・記述し、それを管理・利用するためのものである。又、当初設定された知的インタフェースシステムのテーマについては、基礎的な自然言語処理技術に絞って、知識情報処理技術の一環で研究を進めた。知識情報を管理する技術 (DB/KB技術) としては、前述のKappaや知識表現言語を研究し、知識を利用するための基礎技術としては、高度な推論を行うための技術やプログラムの検証・合成や最適化技術等の要素技術を研究して来た。これらの要素技術開発やソフトウェア試作 (図6) について、前・中期では基礎ソフトウェア各テーマにおいて逐次ベースで、後期では知識プログラミングソフトウェアの各テーマにおいて並列ベース (KL1記述) で行った。

知識表現の研究は、種々の分野での人間の用いている知識を記述しうる言語の設計と、その効率的処理系の開発を行うことである。前期から中期にかけては、まず個々の適用分野毎に適した記述を行う数種類の逐次型言語を設計した。CIL (Complex Indeterminate Language) は自然言語処理における意味や状況記述をするためにPrologを拡張したものである。CRL (Complex Record Language) は非正規関係DBソフトウェア上の演繹DBのための内部表現に用いられる知識表現言語の1種として開発された。CAL (Contrainte Avec Longique) は問題を制約として宣言的に記述する逐次制約論理プログラミング言語である。

後期において、CILとCRLの開発経験に基づき、並列型知識表現および知識ベース言語としてQuixoteを開発した。Quixoteは演繹オブジェクト指向言語であり、KBMSにおけるユーザインタフェースとしての重要な役割も持たせており、Kappa-P上に構築してある。この機能によりKappa-P上に単なる事実データを集積したデータベースシステムから始めて、後に規則データを付加して行くことにより知識ベースシステムへと拡張

することが可能となっている。

又、CALの開発経験に基づき並列型制約論理プログラミング言語GDCC (Guarded Definite Clause with Constraints) の処理系をKL1で実装した。制約論理プログラミング言語は、なにを解くのかという解を得るための条件を記述するのみで、解くための手続きを考える必要がなく、処理系が制約を解消して解を求めることのできる高水準言語である。GDCCは、ロボットの腕の制御プログラムの作成等の応用に適用して機能の検証を行った。

定理やプログラムの正しさを証明するための基礎技術として前・中期において証明支援技術の研究を行い、証明支援システム(CAP)実験版を前期に試作し、中期において改良・拡張を行うと共に等号に対する数式変換を行う項書き換えシステム(TRSおよびMetis)を開発した。又、プログラム検証合成実験システム等を開発した。後期において、モデル生成法による定理証明システムMGTP (Model Generation Theorem Prover) を開発し、一階述語論理のためのPIM上の推論エンジンとして世界最高速の能力を示した。MGTPは非単調推論やプログラム合成という基礎研究分野の応用や法的推論システムにおけるルールベース推論エンジン部として使われ、知識記述の高レベル化を可能にした。更に数学者が未解決問題として提示した群論の問題の一部を解ける能力を示した。これは高い並列推論処理能力が応用システムの知識レベルを高めた典型例である。

プログラムの最適化に関する研究として、メタプログラミングの部分計算による最適化や展開・畳み込みプログラム変換法の研究を行い、その有効性を示した。高度な推論方法や学習メカニズムの研究としては、仮説推論や定性推論技術に基づくツールを試作し、実際の応用問題に適用し有効性を確認した。又、非単調推論や類推の形式化等の研究を行った。

自然言語処理技術の研究開発としては、ツールの開発と実験システムの試作を行った。自然言語処理のためのソフトウェアツールとして、前期においてBUP (Bottom up Parser) や小規模電子化辞書の実験版を試作し、中期において汎用日本語処理ツール(LTB: Language Tool

Box) としてまとめ、更にツールの追加や改良等を行った。LTBには形態素解析のLAX (Lexical Analyzer)、構文解析のSAX (Syntactic Analyzer)、文生成、言語データベース等のツールがある。これらのツールの機能検証と自然言語理解の研究のための実験システムとして、前期に談話理解実験システムDUALSの第1版を試作し、中期において第3版まで改良した。後期においては、これらの研究成果を踏まえて並列自然言語処理実験システムとして特定の問題に関する知識を与え、その問題について論じる立論システム(Dulcinea)を試作した。

3. 実験的応用システムに関する成果の推移

応用システム開発の目的は、記号処理システムの評価のためのベンチマークプログラムとすること、および記号処理技術や知識情報処理技術を探求することである。

前期においては、論理型言語の記述能力、性能、開発効率等の観点での適用性の実験に重点を置き、Prolog記述による論理回路設計支援と配線支援CAD実験システムを開発し、前述のSIMPOSの開発成果と合わせて論理型言語の適用性の高さを実証した。中期においては、応用分野を拡大し、配置と論理設計CAD、故障診断、プラント制御、囲碁対局システム等の実験システムをESP記述により試作し、ESP開発環境の評価を行い、かつ知識情報処理技術の機能を実証した。

中期後半においてマルチPSI、PIMOSの開発により並列応用ソフトウェアの研究開発が可能となり、まずKL1記述による並列プログラムの開発実験と並列システムの評価のために、小・中規模のプログラム—並列構文解析(PAX)、ペントミノ、最短経路、詰め碁の4プログラム—を試作し、PIMOS開発と合わせてKL1の並列記述性の良さを実証した。

後期において、中期までの開発成果を踏まえ、機能実証・評価目的の他、並列プログラミング技術や知識の表現・管理や推論機能を探求することに重点を置くこととした。そのため、工学的分野の他、大規模な知識処理・記号処理を学際的分野に広げることが検討し、遺伝子情報処

理や法律エキスパートシステムを追加し、全体としては次に示すKL1記述による並列応用実験プログラムを開発し、並列アルゴリズムや負荷分散技術を開拓すると共にKL1をベースとする並列推論システムの特徴を実証した。

- ① VLSIのCADシステム：VLSIの論理シミュレーション、配線、配置を行うプログラムを作成し、並列処理のアルゴリズムや負荷分散の研究を行った。プログラムにより異なるプロセッサ数に対し、20%から65%程度の大きな台数効果を得た。
- ② 遺伝子情報処理：蛋白質の配列解析システムや、蛋白質の折り畳みのシミュレーションプログラムを開発した。配列解析システムは、解析速度および解析品質の両条件において優れたシステムであり、かつ高い台数効果を示した。
- ③ 法的推論システム：法律の条文と、過去の判例を蓄えた知識ベースを用いて、事件の被告人が、どのような罪に該当するかを推論するシステムであり、人間の社会システムの実例を扱っている。ルールベース推論のエンジンとしてMGTPを使用することにより、法律知識の記述が自然なものとなり、並列処理能力がシステムの知的レベルを高めた良い例である。
- ④ 電子装置や発電プラント等の診断システム：電子装置や発電プラントの機器や、それらの動作、機能、故障の性質などを知識として蓄えておき、故障や異常が発生した時に、その原因を推論して、表示したり、回復処理をとるシステム。並列処理により、複雑な推論を短時間に行える特徴がある。
- ⑤ 囲碁システム：囲碁の対局を行うシステムで、碁盤上の石の位置を抽象度を順次増した記述レベルにより表現する方法で定石を記述して、知識ベースとしている。人間の初心者なみの強さに達しているが、処理能力向上が知的レベルを向上させるには至っていない。

4. 第五世代コンピュータプロトタイプシステムの構成技術の特徴と技術的評価

本プロジェクトの研究開発成果は、以上に述べた推移を経て、図7に示す構成の第五世代コ

ンピュータプロトタイプシステムとして統合されている。推進委中間報告、海外アンケート結果等に基づき、研究開発成果に対する技術的・学術的観点からの評価を述べると共にプロトタイプシステム構成技術の特徴を説明する。

並列論理プログラミング言語KL1に基づく並列推論マシンPIMと、そのオペレーティングシステムPIMOS、並列知識ベース管理システムKappa-Pにより、世界最高速の推論能力を持つ統合的並列推論システム—世界唯一の並列処理と論理プログラミング言語を利用した知識処理システムを開発するための本格的なソフトウェア開発環境—を実現している。このことから、第五世代コンピュータを「知識ベースを用いる推論技術」と「高度並列処理技術」により実現する目標に対して、並列論理型パラダイムをプロトタイプシステムのすべての階層に対する共通基盤として適切に設定し、一環した技術体系を構築したと言える。

海外アンケートにおいても、並列記号処理技術が世界の技術水準に比して、「卓越／優秀」の意見が約70%であり、主には並列ハードウェア、GHC/KL1、PIMOSや並列ソフトウェアの技術を高く評価している。

個々の技術要素としては、まず並列記号処理言語KL1を、暗黙の細粒度並列性、データフローによる自動同期やスケジューリング・負荷分散とプログラムの意味の分離を特徴とする言語として設計し、その実装アルゴリズムを確立し、かつ大規模並列ハードウェア上に高い処理性能と効率的実装を実現した。

並列ハードウェアとしては、KL1のための命令セットやタグアーキテクチャや自動メモリ管理のための機能等を特徴とするプロセッサと異なるプロセッサ間結合方式等による複数モデルを試作・評価し、バランスのとれた高性能並列記号処理のためのハードウェア技術を確立した。又、当初目標（調査委報告）の処理能力である100MLIPS以上を大規模モデルで達成し、更に1モデル最大512プロセッサの実装や1,000台規模のソフトウェア開発環境を実現したことから、当初目標の実装規模をほぼ達成したと言える。

並列記号処理ソフトウェア技術としては、管

理の集中によるオーバーヘッドをなくすための階層的な分散資源管理法や通信ストリーム上の種々の抽象化により並列OSのシステム管理技術を確立し、OS自身の高い並列性、局所性やハードウェアやサービス機能に対する柔軟性を実現した。又、大規模並列ソフトウェア開発に必要な開発環境技術としてデバッガやトレーサの他に性能チューニングのための負荷分散状況の情報収集・可視化機能等を実現した。更に知識プログラミングシステムや並列応用プログラムの開発を通じて、全探索法・最適探索技法・枝刈り技法等の並列プログラミング技法および動的／静的負荷分散の諸技法を開発した。これにより、複雑で非定型な問題を効率的にプログラミングし、かつ並列実行するための管理・制御技術、ソフトウェア開発環境の実現技術、およびプログラミング技法や負荷分散技法を実践的に確立し、当初目標を十分に達成したと評価された。

並列推論システム上の知識情報処理のためのソフトウェアとして、Kappa-Pのユーザインタフェースとなる知識表現言語Quixoteや並列制約論理プログラミング言語GDC、並列定理証明を行うMGTP、自然言語処理のための各種ツール等が開発された。これにより世界でも類例のない高度な知識処理のための基本機能を有した知識処理システムをプロトタイプシステムで実現し、知識情報の表現・管理・利用の諸技術を並列論理型パラダイムに基づいて構築したと評価された。海外アンケートにおいても、知識情報処理における技術水準が世界の水準に比して、「卓越／優秀」の意見が65%であり、主には定理証明、制約論理プログラム等の技術を高く評価された。

個々の技術要素としては、まず知識表現技術に関して、高レベルで多角的な知識記述を行う知識表現言語を開発し、かつ各種の領域に適用し、人間の持つ知識のさまざまな性質を計算機処理の側面から明らかにした。

知識情報管理技術としては、非定形的なデータを扱う非正規関係DB技術やルールベース等の知識情報を扱う演繹オブジェクト指向技術を並列／分散DBとして実際に並列処理システム上に効率的に実装できることを示し、かつ当初

目標の知識ベースメカニズムを実現した。

知識利用基礎技術としては、MGTPにより高機能かつ高並列（処理対象により80%以上の台数効果）な推論エンジンを実現し、かつ数学的問題や法的推論の具体的な応用システムに有効に適用した。又、高次推論や学習の基礎技術のための多くの知見を生み出した。

応用システムに関しては、開発した並列記号処理技術と知識情報処理技術を具体的な応用分野の問題に適用し、これらの技術により提供するシステムの機能の適切性や開発の効率性を実践的に実証したと評価された。例えば法的推論システムはMGTPをエンジンとする法令文の処理と類似検索による事例ベース推論処理を約4,500行のプログラムで、直接の開発稼働約9人月で試作できた。又、LSICADの各プログラムの最初の版は各々数千行以上で、2～4人月で試作され、その後、数多くの技術的手法の実験を効率的に行うことができた。

以上の評価をベースに、並列推論システムの特徴をまとめると、「自然同期機構や自動メモリ管理（カーページ処理等）を言語（KL1）の基本機能として備えている」ことから、並列処理特有の同期のバグが激減することによりソフトウェア開発期間が短縮でき、プロトタイプによる実験や高レベルの並列アルゴリズムや問題解決手法の研究開発にソフトウェア開発者が専念できることである。これは従来の手続き型言語による並列処理や分散処理においては、プロセス間同期やメモリ管理は応用プログラム開発者の責任であり、簡単な問題でも並列処理特有の問題を熟知していることが必要で、知識処理のような並列の動きが予め想定できない非定形な並列処理や複雑で大規模な応用問題に対応することが困難であったことと対照的である。図8に示すように従来手法と並列推論システムを比較すれば、世界的に並列アルゴリズムや負荷分散手法等の並列技術が未熟な状況において、比較的短期間に並列OS、並列知識ベース管理システム、種々の知識処理向きのツールや実験的応用プログラムを本プロジェクトで開発できたことは、並列処理に適したKL1言語の有効性とKL1ベースの並列ソフトウェア開発環境の有用性を示していると言える。このKL1と

並列OS (PIMOS) は、大規模汎用並列マシンのための標準的言語とOSの持つべき基本機能を備え、かつ具体例を示すものである。

海外アンケートでは、本プロジェクトの達成した成果の科学技術的進歩への貢献は莫大 (8%) / 大 (40%) / 中 (45%)、貢献範囲は広範 (28%) / 中 (48%)、技術の実用的価値として将来役立つ分野は広範 (62%)、今後の発展性はおおいに (59%) / おそらく (30%) と評価されている。

V. 第五世代コンピュータ技術の今後の課題と展望

第五世技術は、LSI技術の進歩、特に3年で約4倍のゲート数となる集積度向上が並列方式の性能価格比を逐次方式に比し大幅に優位にするとの認識に基づいている。本プロジェクトでの実績では、推論マシンのサイズは、開発サイクルの約3年毎に約1/4となり、プロトタイプシステムの1CPUを1ボードで実現した。この延長上で、2000年頃には、デスクサイド筐体に100台、大型筐体に1,000台程度のプロセッサを実装しうると予測できる。又、プロセッサ当りのコストは3年毎に約半減し、プロセッサ当りの推論処理性能は3年毎に逐次処理では4倍以上、並列処理では約2.5倍に向上した。この向上率は今後の鈍化を想定しても、2000年頃にはスペース性能比の向上により1大型筐体で1~数GLIPS程度を実現可能であろう。又、価格性能比では、例えばRISCプロセッサ (WS) の市場での向上率が3年で約5倍と言われているのに比しても十分高い実績である。

一方、商用技術においても、並列処理技術の性能価格比における優位性は、数値計算分野ではすでに実証されつつあり、高度なパイプライン処理によるベクタプロセッサから多数の小規模プロセッサを結合した並列システムへの移行が始まっている。更には、従来の汎用機の適用分野への並列処理の導入も始まろうとしており、昨年後半には、数~十数台の高性能のRISCプロセッサを密結合したシステムを汎用機メーカー等が発表した。このようなハードウェアは並列記号処理に最適ではないが、十分適用可能で、単なるハードウェアの並列化技術は競争的領域

に入りつつあると考えられる。

一方、複雑で非定型な処理が必要な分野を始めとして、並列記号処理技術、特に言語や並列ソフトウェア技術への必要性が今後高まって行くものと考えられる。このことから、第五世代の並列記号処理技術は、今後10年程度の間になんたな適用領域を次々に開拓して行くことになると予測される。なお、海外アンケートでの並列記号処理システムの研究利用は直ちに (27%)、1~3年度 (27%) であり、商業利用は0~5年後 (42%)、6~10年後 (19%) の意見であった。

知識情報処理はその複雑・非定型な処理の代表例であり、本プロジェクトが示した知識情報処理の基礎的諸技術は、複雑な問題を扱う際に有効性を発揮し、実用的な適用分野の拡大に役立つものである。しかし知識情報処理の基礎を固めたと言える段階であり、高度な推論技術および知識表現や知識を構造化する技術等の基礎的課題について、今後共長期的な研究を行って行くことが必要である。このような研究開発を更に5年~10年続ければ、数多くの分野で実用的な知識情報処理技術が確立され、次世紀初頭以降、本格的に適用され普及していくものと予想される。なお、海外アンケートでの知識情報処理システムの、研究利用は直ちに (27%)、1~3年後 (27%) であり、商業利用は0~5年後 (41%)、6~10年後 (18%) の意見であった。

本プロジェクトにおいて、近い将来における並列処理の適用分野の開拓の意図もあり、学際分野を含むさまざまな応用分野についての実験的応用プログラムを開発し、その中には研究用のツールとして利用できるものも含まれている。今後適用される応用分野としては、本プロジェクトの対象とした分野の他に、大規模オンラインシステムや非定型性のある並列数値計算処理や種々のデータベースシステム等の汎用的応用分野、および知的CAIシステムや専門分野毎の知的な情報蓄積・検索・コンサルテーションシステム等の学際的なシステムが考えられ、そのための研究開発が必要である。

本プロジェクトは、プリコンペティティブな基礎技術の開発を目指し、体系化された開発技術を実際のプロトタイプシステムや多数の論文や公開ソフトウェアを通して世に示した。しか

し、これ等の成果はプロジェクト終了時点でもプリコンペティティブな技術であり、これをどう発展・普及させるかの方策が必要である。推進委中間報告では、民間はハードウェア等競争的領域に入りつつある技術の実用化に向けて主体的に取り組むこと、大学等は基礎理論や基礎段階の技術の研究を進めることへの期待を述べている。更に、国として研究を進める分野として第五世代コンピュータ技術の研究基盤化を行うことにより、技術の発展と幅広い普及を図り、合わせてソフトウェアの無償公開などの新政策を国際貢献の場で実のあるものとすることを目指すこと等が提言されている。この提言を受け、第五世代後継プロジェクトとして、「第五世代コンピュータの研究基盤化プロジェクト」を1993年度から2年間実施し、本報告で述べた第五世代技術を市場にあるUNIXベースの技術と融合させ、これから本格化する並列処理や知識処理応用の技術開発のための強固な基盤とすることを目指すこととしている。後継プロジェクトではKL1や並列OS等の第五世代技術を国内外に広めるための方策として、まずKL1言語処理系と基本ソフトウェアをUNIXベースのWSや並列マシンに移植する。現在は、KL1プログラムの実行には推論マシン上で行うか、UNIX上のKL1プログラミング環境PDSSを利用するかが必要であるが、PDSSはKL1言語学習用程度の性能であるのに対して、10倍以上高速（百MIPSのマシンで2MLIP程度）かつポータブルなKL1処理系をC言語記述で開発する。又、並列推論システムを大学・企業等の研究者に共同研究等の枠組で公開し、かつ第五世代技術を継承した並列知識処理ソフトウェアの研究を実施する。この後継プロジェクトで開発するソフトウェアも同様にIFSとして公開することを通じて第五世代技術は更に発展・普及し、広く一般に利用されるであろう。

VI. あとがき

第五世代コンピュータプロジェクトは、ICOT内外の直接的な研究開発担当者約1,000人、WG等の委員として意見を頂いた大学等の専門家数百人、更に通産省等多くの機関の方々の努

力や支援により進められ、当初目標である「並列論理型パラダイムに基づく、大規模知識情報処理のための一貫した技術体系」を確立し、その評価を得たと考えている。本報告では、学術的に誰の業績との表現はとらないで、プロジェクト全体として、どのような観点で進め、何を生み出したかをプロジェクト論、組織・運営論、目標の設定、目標と成果の対比、成果の推移、最終的な成果、評価等の種々の切り口で説明するように努めた。しかし、紙面に限りがあり、技術面については十分な説明とまらない部分も多いと思われる。興味のある方はFGCS'92のプロシーディングやICOT TR/TM等をお読み頂き、更にはIFSとして公開したソフトウェアを御利用頂ければ幸いである。

本報告に当り、プロジェクトを直接・間接的に支えて来た多くの方々と総合報告の機会を与えて頂いた本学会の方々に感謝致します。

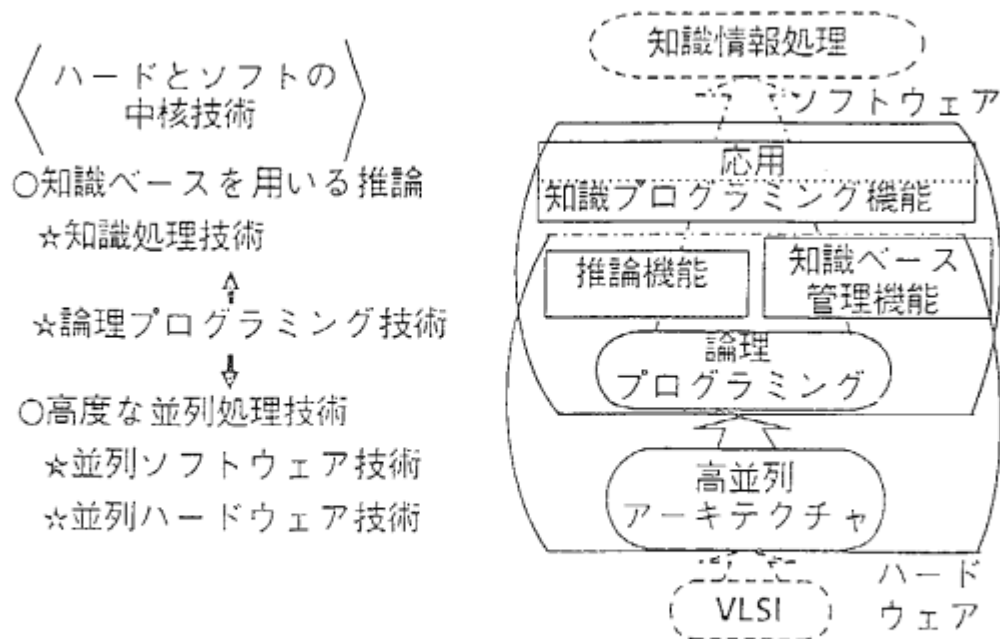


図 1 第五世代コンピュータの枠組み 知識情報処理を指向し、並列推論処理による新しいコンピュータの体系的技術。

表1 調査委員会提案およびプロジェクトの前・中・後期における研究開発課題一覧

調査委員会提案	前期（'82～'84）	中期（'85～'88）	後期（'89～'92）
問題解決・推論システム ①問題解決・推論メカニズム ②問題解決・推論マシン	●基礎ソフトウェア ①5G核言語 ②問題解決推論ソフト ③知識ベース管理ソフト ④知的インタフェースソフト ⑤知的プログラミングソフト	●基礎ソフトウェア ①5G核言語 ②問題解決推論ソフト ③知識ベース管理ソフト ④知的インタフェースソフト ⑤知的プログラミングソフト ⑥機能実証ソフト	●機能実証ソフトウェアシステム
知識ベース・マシン ①知識ベース・メカニズム ②知識ベース・マシン			●知識プログラミングソフトウェアシステム ①知識構築利用ソフト ②自然言語インタフェースソフト ③問題解決・プログラミングソフト（制約、定理証明） ④高次推論
知的インタフェース・システム			
開発支援システム ①ソフトウェア開発用パイロット・モデル ②VLSI化技術とシステム・アーキテクチャ			
基本応用システム ①機械翻訳システム ②コンサルテーション・システム ③知的プログラミング・システム	●ソフトウェア開発用パイロットモデル ①逐次型推論マシン（SIM）ハード ②SIMソフト	●開発支援システム ①並列ソフトウェア開発用パイロットモデル ②開発支援ネットワークシステム	●基本ソフトウェアシステム ①推論制御モジュール（PIMOS） ②知識ベース管理モジュール（KBMS:Kappa & Quizote）
	●ハードウェアシステム ①PIM機能メカニズム ②KBMS機能メカニズム	●ハードウェアシステム ①推論サブシステム ②知識ベースサブシステム	●プロトタイプハードウェアシステム

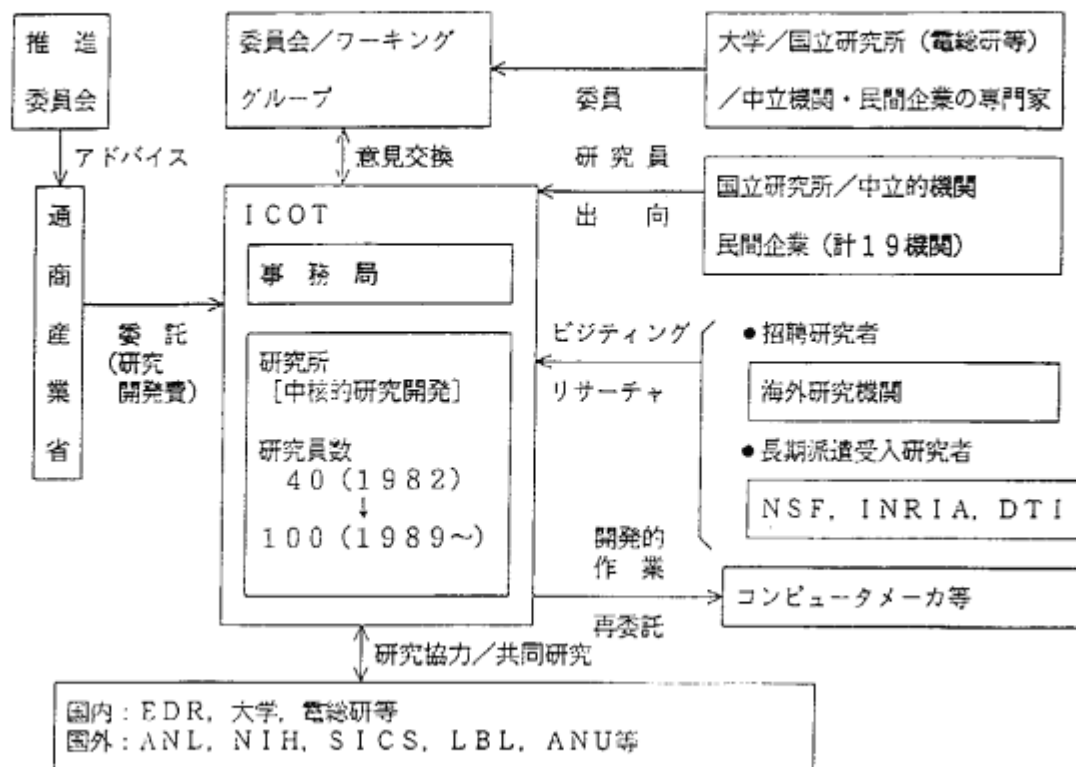


図 2 FGC S プロジェクト推進体制

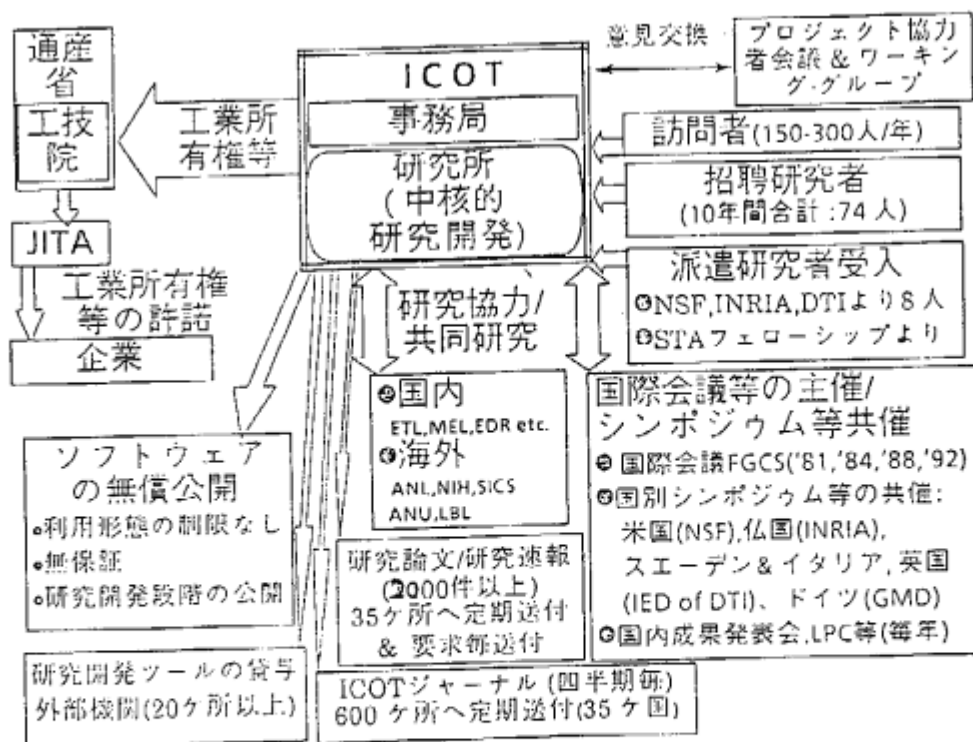


図 3 研究交流および研究成果の普及の枠組み

表 2 研究開発環境の推移

年 度	開発用言語	開発用マシン
'82~'84	Prolog	汎用機
'84~'88	ESP	PSI-I (約100台) PSI-II (約300台)
'88~'92	KL1	PSI-II (約300台) PSI-III (約100台) マルチPSI (7セット)・PIM

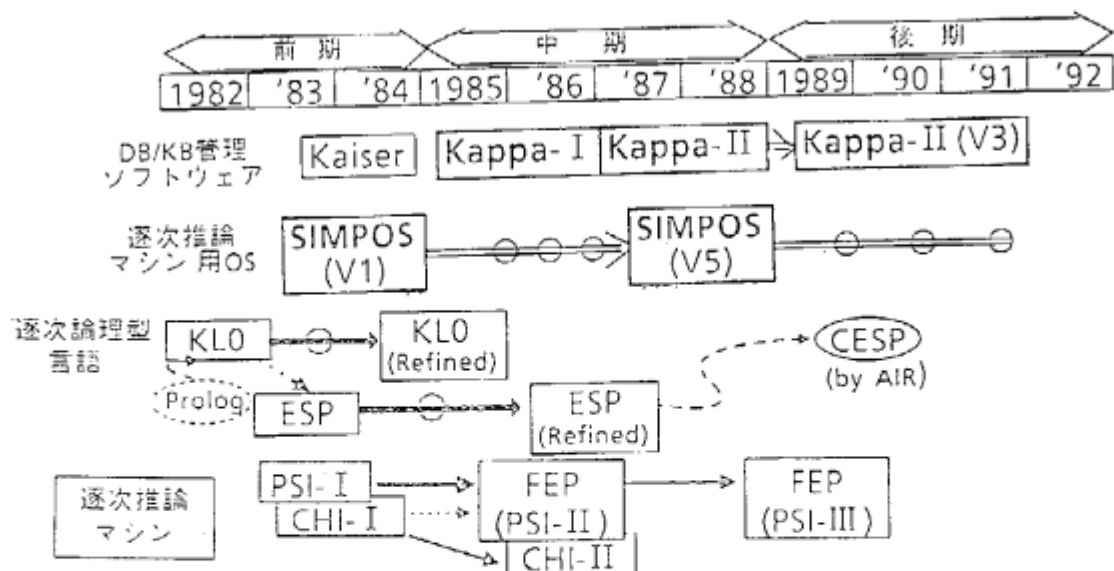


図 4 逐次記号処理技術の推移 言語・ハードウェア・基本ソフトを体系的に開発。

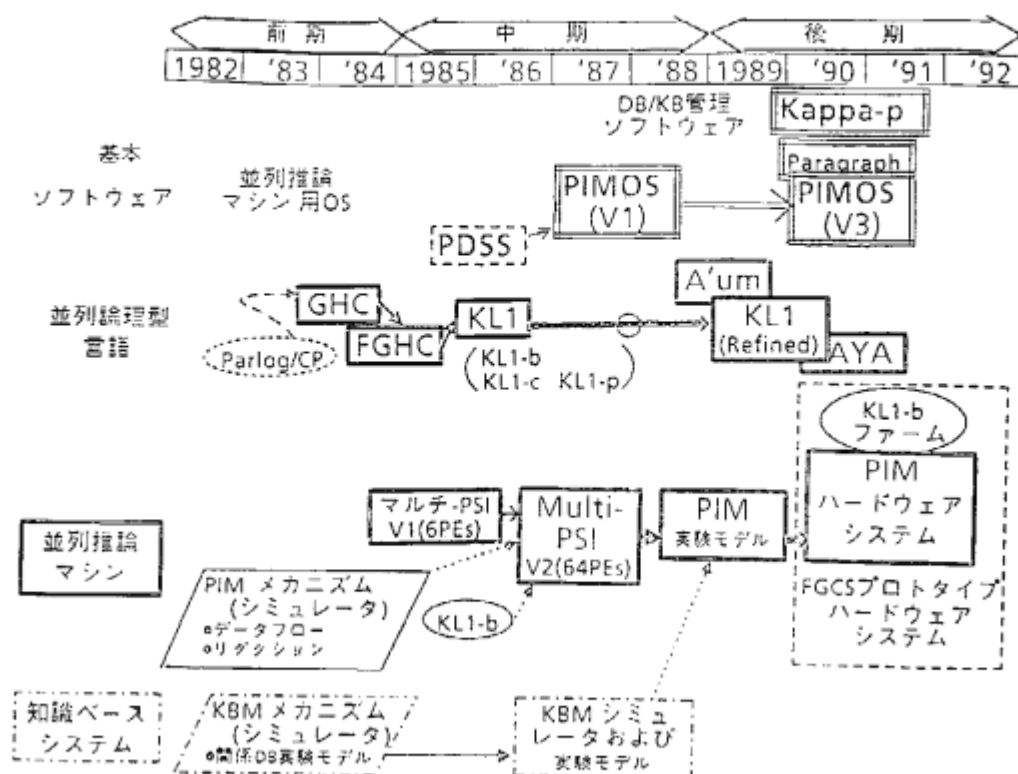


図5 並列記号処理技術の推移 言語 (KL1)・ハード (PIM)・基本ソフト (PIMOS 等) を体系的に開発。

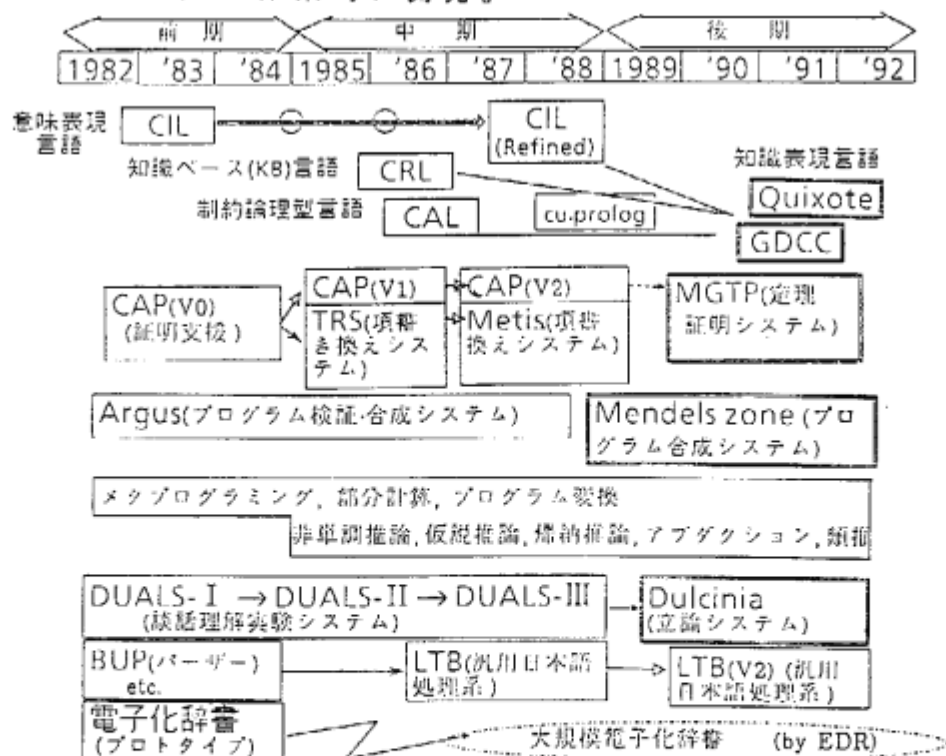


図6 知識情報処理技術の推移 記号処理技術をベースに、知識表現や知識プログラミングの諸技術を体系化。

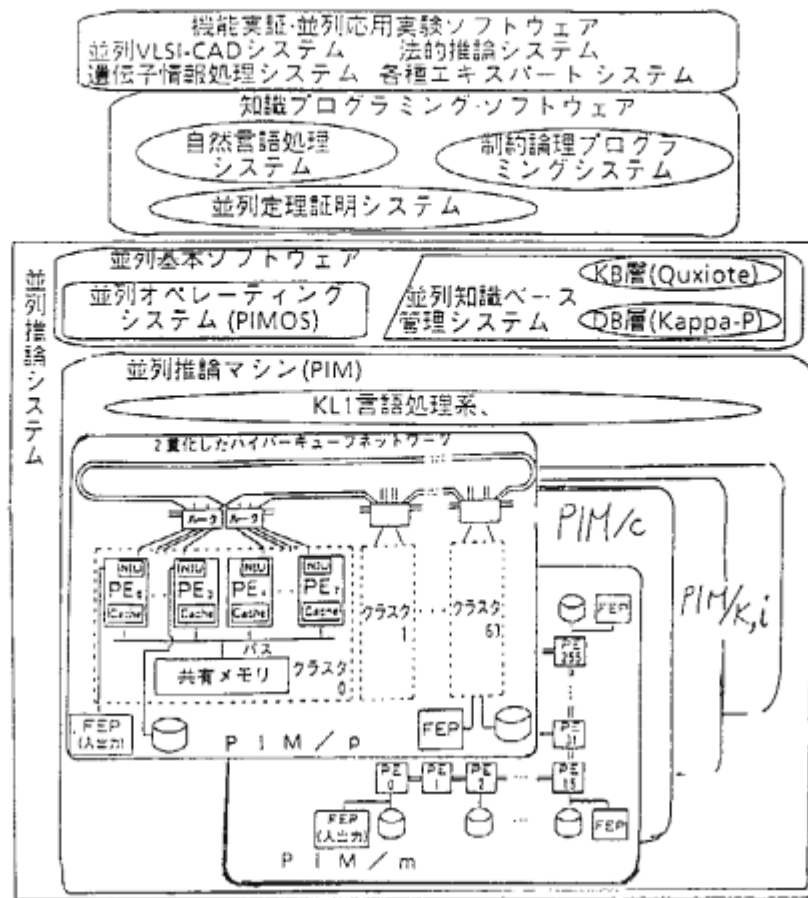


図7 第五世代コンピュータプロトタイプシステムの構成 基本ソフトウェア、知識処理ソフトウェア等がKL1記述によりKL1マシンとしてのハードウェア上に体系化された。

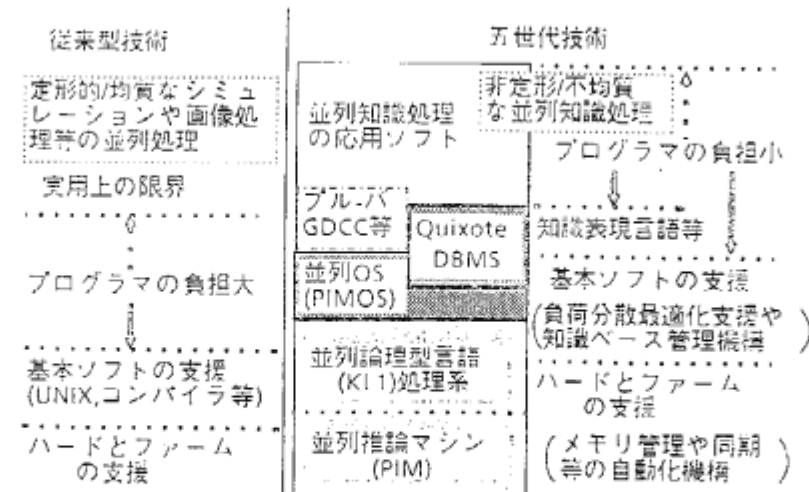


図8 並列ソフトウェア作成技術の比較 従来言語の拡張等による従来型技術に対し、記号処理技術は大極な作成効率の向上等の特徴がある。

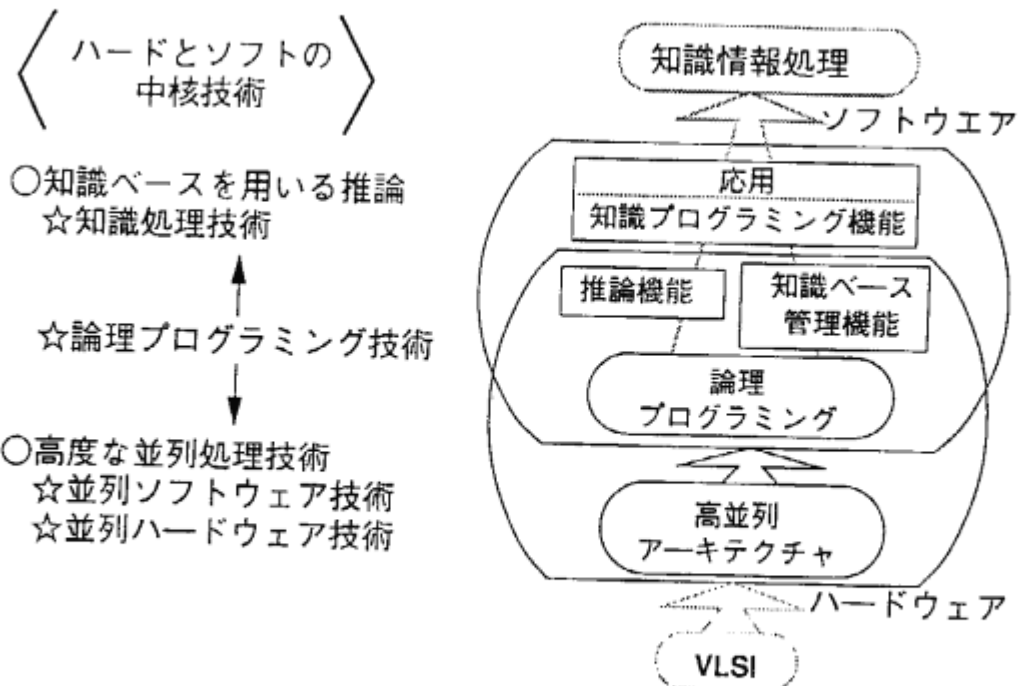


図1 第五世代コンピュータの枠組み 知識情報処理を指向し、並列推論処理による新しいコンピュータの体系的技術。

表1 調査委員会提案およびプロジェクトの前・中・後期における研究開発課題一覧

調査委員会提案	前期 ('82~'84)	中期 ('85~'88)	後期 ('89~'92)
問題解決・推論システム 1)問題解決・推論メカニズム 2)問題解決・推論マシン	●基礎ソフトウェア 1)5G核言語 2)問題解決推論ソフト 3)知識ベース管理ソフト 4)知的インタフェースソフト 5)知的プログラミングソフト	●基礎ソフトウェア 1)5G核言語 2)問題解決推論ソフト 3)知識ベース管理ソフト 4)知的インタフェースソフト 5)知的プログラミングソフト 6)機能実証ソフト	●機能実証ソフトウェアシステム
知識ベース・マシン 1)知識ベース・メカニズム 2)知識ベース・マシン			●知的プログラミングソフトウェアシステム 1)知識構築利用ソフト 2)自然言語インタフェースソフト 3)問題解決・プログラミングソフト(制約、定理証明) 4)高次推論
知的インタフェース・システム			
開発支援システム 1)ソフトウェア開発用パイロット・モデル 2)VLSI化技術とシステム・アーキテクチャ			
基本応用システム 1)機械翻訳システム 2)コンサルテーション・システム 3)知的プログラミング・システム	●ソフトウェア開発用パイロットモデル 1)逐次型推論マシン(SIM)ハードウェア 2)SIMソフトウェア	●開発支援システム 1)並列ソフトウェア開発用パイロットモデル 2)開発支援ネットワークシステム	●基本ソフトウェアシステム 1)推論制御モジュール(PIMOS) 2)知識ベース管理モジュール(KBMS:Kappa & Quixote)
	●ハードウェアシステム 1)PIM機能メカニズム 2)KBM機能メカニズム	●ハードウェアシステム 1)推論サブシステム 2)知識ベースサブシステム	●プロトタイプハードウェアシステム

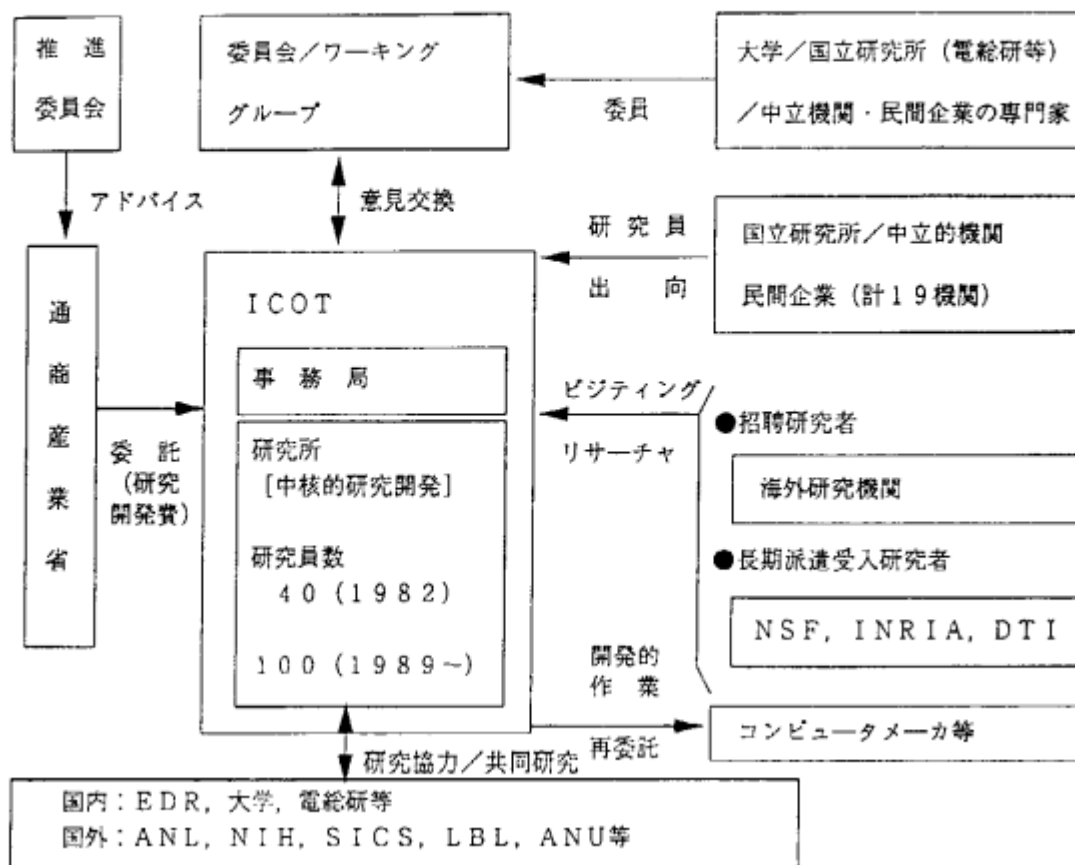


図 2 FGCSプロジェクト推進体制

表 2 研究開発環境の推移

年 度	開発用言語	開発用マシン
'82~'84	Prolog	汎用機
'84~'88	ESP	PSI-I (約100台) PSI-II (約300台)
'88~'92	KL1	PSI-II (約300台) PSI-III (約100台) マルチPSI (7セット), PIM

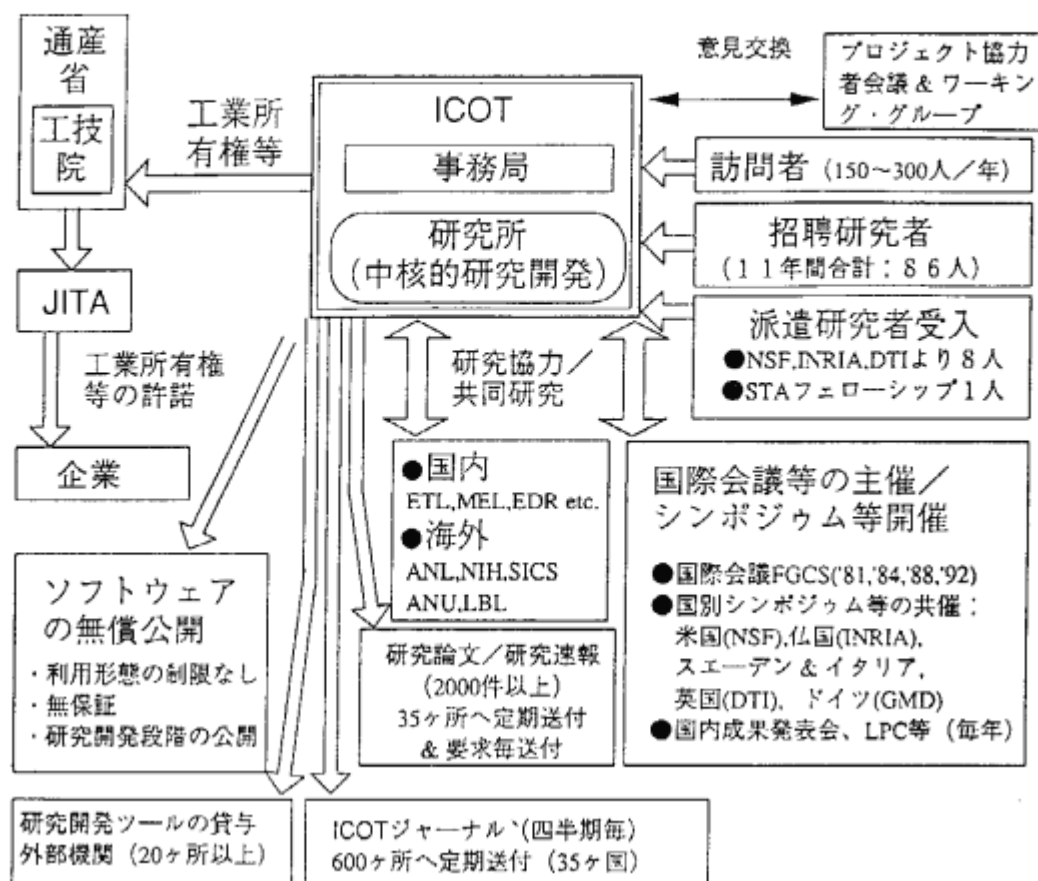


図 3 研究交流および研究成果の普及の枠組み

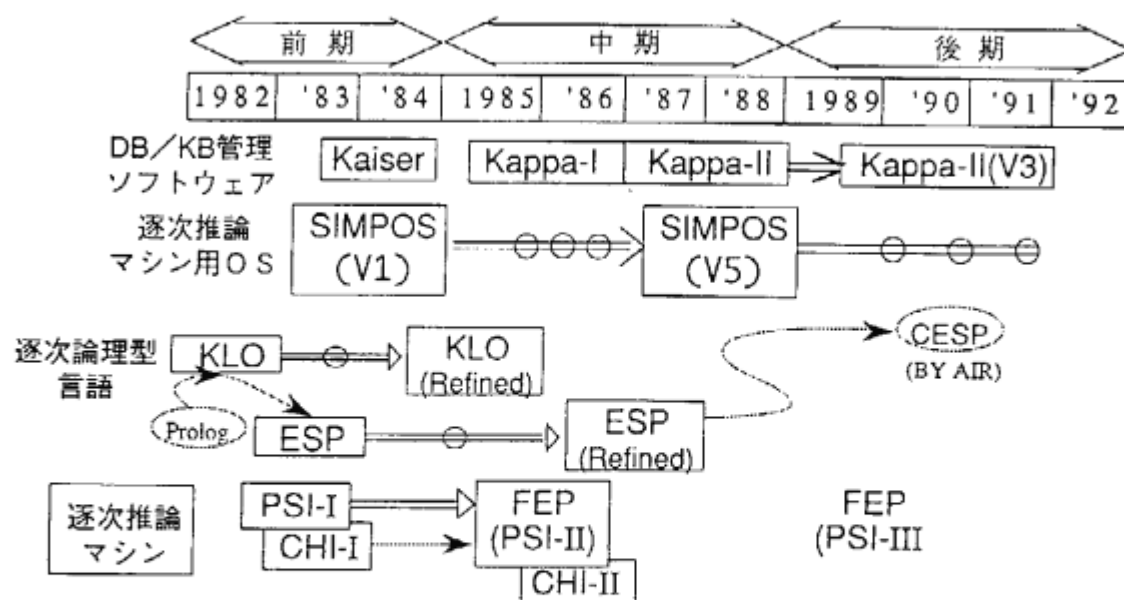


図 4 逐次記号処理技術の推移 言語・ハードウェア・基本ソフトを体系的に開発。

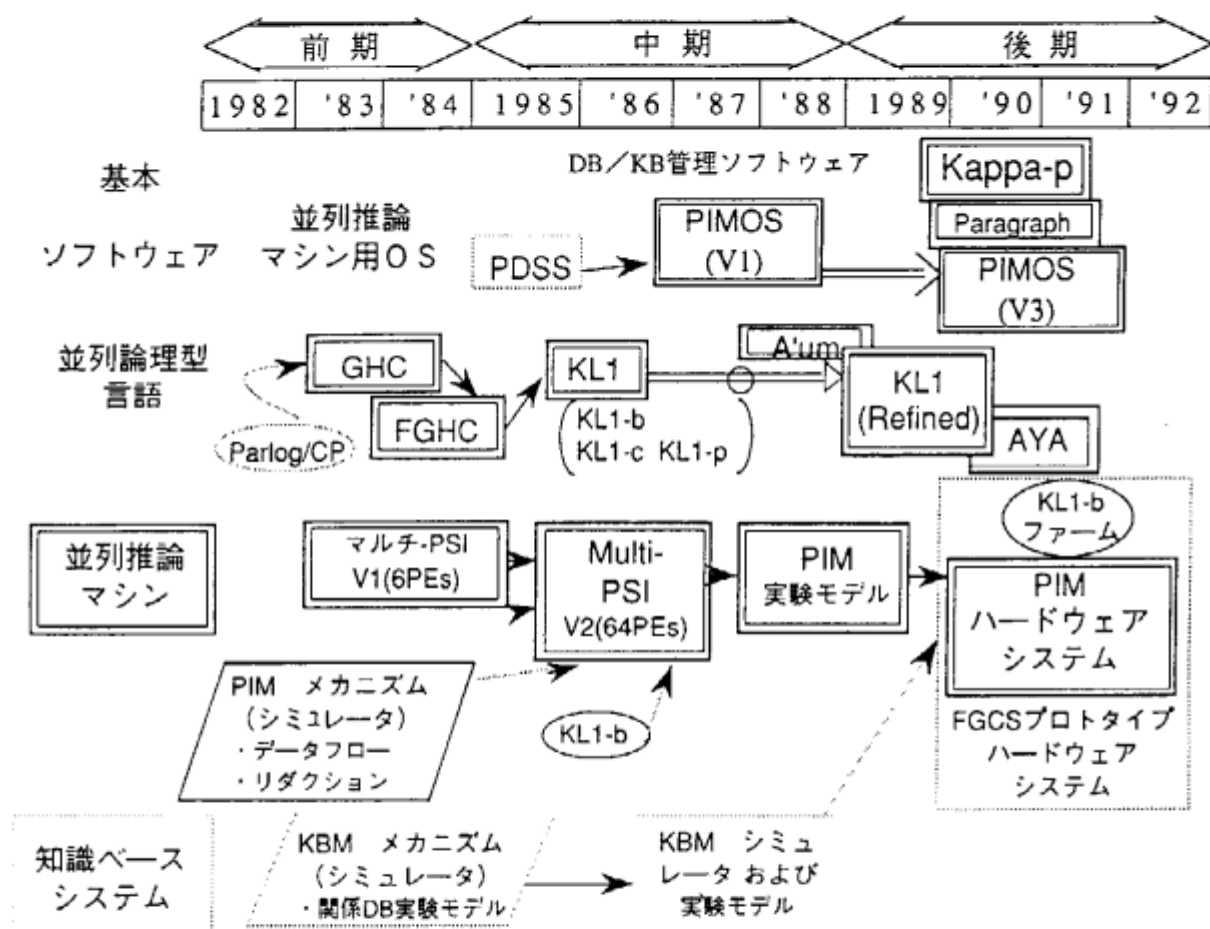


図5 並列記号処理技術の推移 言語 (KL1) ・ ハード (PIM) ・ 基本ソフト (PIMOS等) を体系的に開発。

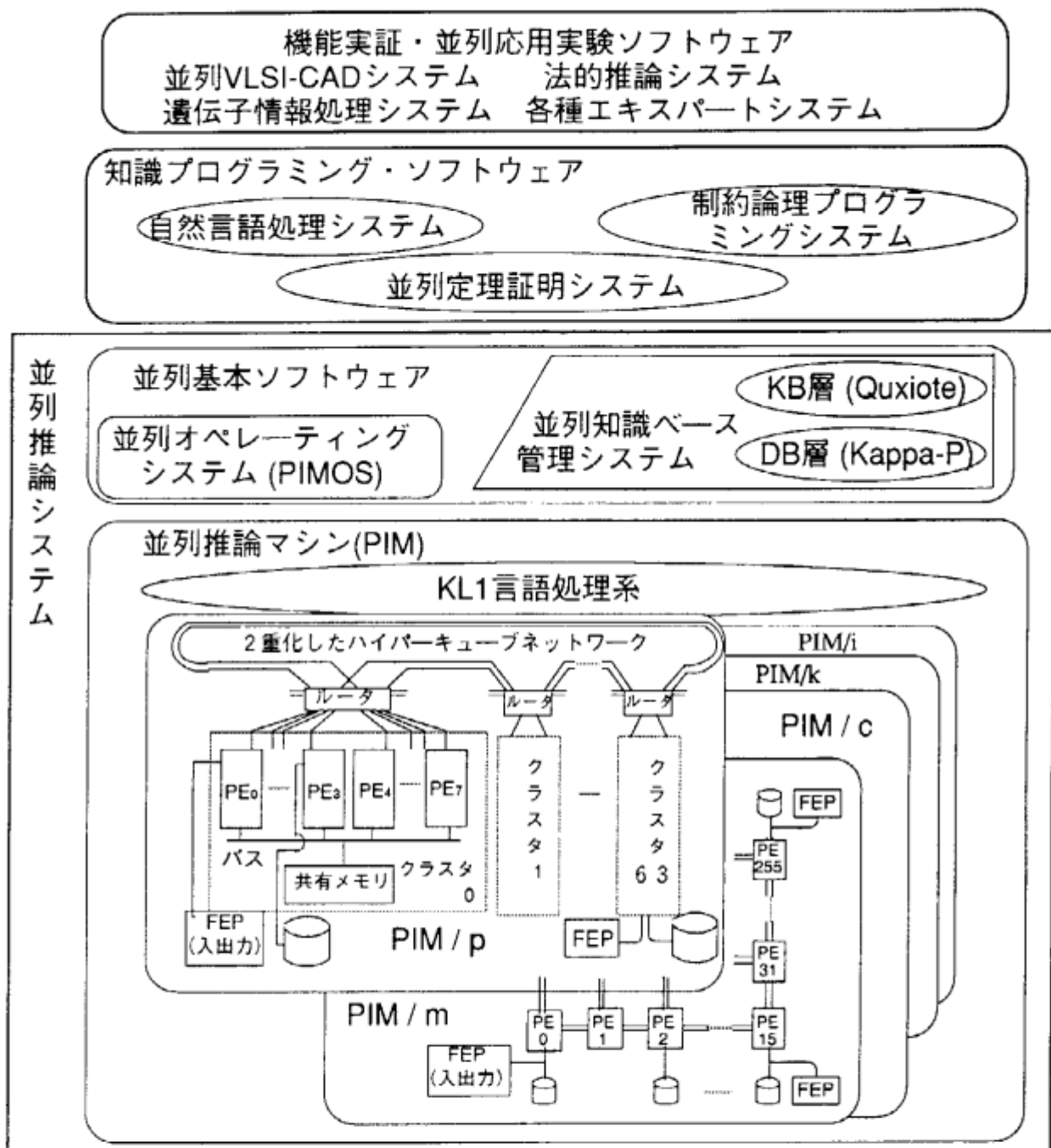
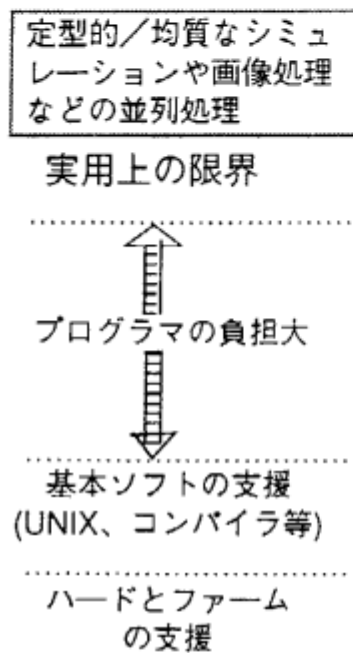


図 7 第五世代コンピュータプロトタイプシステムの構成
基本ソフトウェア、知識処理ソフトウェア等がKL1記述によりKL1マシンとしてのハードウェア上に体系化された。

従来型技術



五世代技術

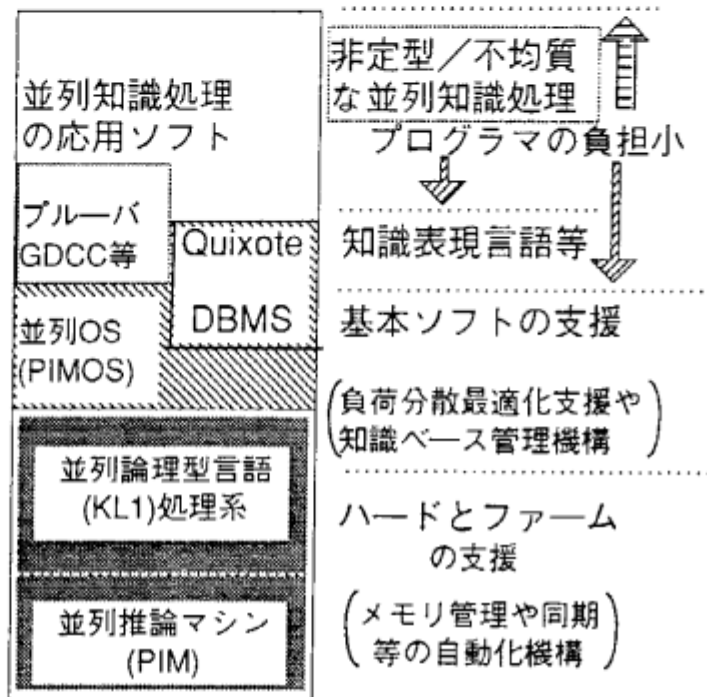


図 8 並列ソフトウェア作成技術の比較
従来言語の拡張等による従来型技術に対し、記号処理技術は大幅な作成効率の向上等の特徴がある。