

戦略的創造研究推進事業

－CRESTタイプ－

研究領域

「情報システムの超低消費電力化を目指した技術
革新と統合化技術」

研究領域事後評価用資料

平成25年2月24日

目次

1. 研究領域の概要.....	1
(1) 戦略目標.....	1
(2) 研究領域.....	2
(3) 研究総括.....	2
(4) 採択課題・研究費.....	3
2. 研究領域および研究総括の選定について.....	4
3. 研究総括のねらい.....	5
4. 研究課題の選考について.....	6
5. 領域アドバイザーについて.....	7
6. 研究領域の運営について.....	8
7. 研究を実施した結果と所見.....	11
8. 総合所見.....	15

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「通信・演算情報量の爆発的増大に備える超低消費電力技術の創出」

具体的な達成目標

デバイス技術、回路技術、アーキテクチャ、VLSI 技術、システムソフトウェア技術の各技術分野における技術開発、および、それらを統合した技術開発により、スーパーコンピュータから携帯情報端末などの組み込み用情報通信システムまで適用可能な、消費電力あたりの処理性能を 100 倍から 1000 倍にする超低消費電力技術の確立を目指す。

目標設定の背景及び社会経済上の要請

情報通信機器・システムの高性能化に伴い、消費電力の増大が大きな問題になりつつある。例えば、2000 年代初頭当時の技術の延長のままスーパーコンピュータの高速化を進めると、2010 年代には 1 台のスーパーコンピュータを運用するために原子力発電所 1 基並みの電力が必要となり、中央演算装置の発熱は太陽の表面並み（表面温度約 6 千度）に達してしまうことが指摘された。今後のユビキタスコンピューティングの進展により、ネットワークに接続される情報通信機器の数が爆発的に増大し、さらに情報通信機器の高機能化に伴って、全体の消費電力は等比級数的に増加することになる。

このように単なる既存技術の延長線上では物理的に超えることのできない消費電力の壁が存在しており、これは喫緊の課題となっている。スーパーコンピュータや組み込み用情報通信システム等は、これまで我が国が得意としてきた分野であるが、将来にわたって我が国がこの分野で世界を先導していくためには、5 年から 10 年先の実用化を見据えた抜本的かつ画期的な低消費電力化技術の開発に戦略的に取り組むことが不可欠である。

なお、超低消費電力化技術を開発することにより、携帯情報端末やスーパーコンピュータ等の幅広い情報通信機器の高性能化・高機能化が継続できるだけでなく、これまで考えられなかったような情報通信機器の応用分野が切り開かれることが期待される。

目標設定の科学的裏付け

10 年先程度の将来を見据えた場合、抜本的な超低消費電力化を実現するための要素技術として以下のような項目が考えられる。

・デバイス、回路技術分野：

動的閾値制御技術、高誘電率材料技術、磁気抵抗メモリ等の不揮発メモリデバイス技術、単一磁束量子素子等

・アーキテクチャ、VLSI 技術分野：

動的再構成 VLSI 技術、高機能メモリ技術、並列演算処理技術、組込用超低消費電力プロセッサを活用したスーパーコンピュータ等

・システムソフトウェア分野：

低消費電力化のためのコンパイラ技術、OS 等による資源制御技術等

このように、システムの低消費電力化のためには、多くの技術分野におけるチャレンジが必要であり、研究開発すべきテーマは多岐にわたる。さらにシステム全体を統合するためのインテグレーション技術の研究開発も重要であり、要素技術の開発と並行して進めて、プロトタイプシステム等の開発でその成果を検証していく必要がある。この取り組みのためには各分野の研究者・技術者が分野を超えた共同研究の体制をとる必要がある。

また、長期的な課題ゆえ、大学での取り組みが主導的であるが、デバイスの製造技術などは企業が保有しているため、プロトタイプシステムの作成等で産学協同体制を推進していくことが重要である。さらに、この分野の技術発展のためには若手研究者・技術者の育成にも重点を置く必要がある。

(2) 研究領域

「情報システムの超低消費電力を目指した技術革新と統合化技術」(平成17年度発足)

本研究領域は、情報通信システム・ネットワークにおいて、回路/デバイス、VLSI/アーキテクチャ、システムソフトウェア、アルゴリズム/プロトコル、応用/サービスの各システム階層における革新的要素技術の階層統合的な管理、制御によって既存技術による低消費電力化の限界を打破する研究を対象とする。

具体的には、動的電圧制御技術、適応的エネルギー管理技術、動的再構成アーキテクチャ、省電力ネットワークアーキテクチャ、省電力アルゴリズム、並列処理言語・コンパイラ技術等の個別要素技術において飛躍的な高性能化・高信頼化と低消費電力化を実現する研究、各階層の要素技術の統合的な管理によってシステムの超低消費電力化にブレークスルーをもたらす研究、さらには抜本的な超低消費電力化を可能にする新しい原理に基づくハードウェアおよびソフトウェア基盤技術の創出を目指す研究が含まれる。本領域は、各システム階層における飛躍的な技術革新と、それらを統合するシステム技術の開発により、情報システムの消費電力当たりの処理性能を従来の 100~1000 倍にする超低消費電力化技術の確立を目指す。

(3) 研究総括

氏名 南谷 崇 (キヤノン株式会社 顧問)

(4) 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	研究終了時の 所属・役職	研究課題	研究費 *)
平成 17年度	黒田 忠広	慶應義塾大学 理工学部 教授	高性能・超低電力短距離ワイヤレス可動情報システムの創出	526.5
	小林 光	大阪大学 産業科学研究所 教授	極限ゲート構造によるシステムディスプレイの超低消費電力化	432.4
	佐藤 健一	名古屋大学 大学院工学研究科 教授	超低消費電力光ルーティングネットワーク構成技術	376.7
	高田 広章	名古屋大学 大学院情報科学研究科 教授	ソフトウェアとハードウェアの協調による組込みシステムの消費エネルギー最適化	272.2
平成 18年度	小池 帆平	産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 グループ長	しきい値電圧をプログラム可能な超低消費電力 FPGA の開発	219.9
	後藤 敏	早稲田大学 大学院情報生産システム研究科 教授	超低消費電力メディア処理 SoC の研究	360.6
	高木 直史	京都大学 大学院情報学研究科 教授	単一磁束量子回路による再構成可能な低電力高性能プロセッサ	483.4
	中村 宏	東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授	革新的電源制御による次世代超低電力高性能システム LSI の研究	481.8
平成 19年度	市川 晴久	電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授	環境知能実現を目指す超低消費電力化統合システムの研究開発	726.1
	西川 博昭	筑波大学 大学院システム情報工学研究科 教授	超低消費電力化データ駆動ネットワークシステム	322.0
	前田 龍太郎	(独) 産業技術総合研究所 集積マイクロシステム 研究センター 研究センター長	ULP ユビキタスセンサの IT システム電力最適化制御への応用	423.6
	松岡 聡	東京工業大学 学術国際情報センター 教授	ULP-HPC: 次世代テクノロジーのモデル化・最適化による超低消費電力ハイパフォーマンスコンピューティング	276.2
			総研究費	4901.4

*) 各研究課題とも5年間の見込み総額

3年目採択の市川チームの研究費が突出して大きくなっているのは、初年度と2年目に採択した課題・チームが研究期間終了後にULP統合システム構築に参与する仕組みとして、終了チームのうち統合システムへの貢献が高いと見込まれるチームの研究代表者、共同研究者を市川チームの共同研究者として参加させ、異階層連携、異分野連携の研究を推進できる予算措置を講じた結果である。

その他に、当初予算に比べて最終経費が増加しているのは黒田チーム、小林チーム、中村チームであるが、いずれもULP統合システムに向けて期待以上の成果を得る見込みが出てきた時点で製造プロセス改良、チップ試作追加のために総括裁量経費を充てた結果である。

これらは、いずれも領域中間評価で「各階層の最終目標への貢献度にもばらつきが見られるのは当然のことであるが、デモ企画の完成に向け予算面での選択と集中が望まれ、アドバイザーの指導力の強化が重要である」と指摘されたことを領域運営にあたって留意した結果である。

2. 研究領域および研究総括の選定について

○ 研究領域の選定

以下のような検討結果に基づいて本研究領域が選定された。

本研究領域は、情報システムの抜本的な超低消費電力化を実現するため、各階層を統合する技術および各要素技術を研究対象とするものである。階層としては、回路・デバイス、アーキテクチャ、システム・ソフトウェア、アルゴリズム・プロトコル、応用・サービスが挙げられ、これらを階層統合的に研究推進することにより、個々の階層の既存技術では物理的に越えることのできない限界を打破することをねらいとしている。本領域は、統合化技術という新たな研究分野を提唱すると同時に、問題の抜本的解決を図る研究成果が期待され、戦略目標の達成に向けて適切に設定されている。

また、研究課題としては、既存の個別要素技術であっても飛躍的な高性能化と低消費電力化が見込める研究や全く新しい原理に基づく技術も対象とし、様々な階層の研究者の応募が期待されるよう設定されており、優れた研究提案が数多く見込まれる。

○ 研究総括の選定

以下のような検討結果に基づいて研究総括が選定された。

南谷 崇氏は、早くから現在の同期式計算システムの限界を問題として、クロックに捕らわれない非同期システムを提唱しており、その計算システムのアーキテクチャと設

計方法、並びにソフトウェア／ハードウェア設計を統合する複合VLSIシステム設計技術に関する研究を行ってきた。また、同氏は企業研究所における研究経験があることから、本研究領域について実用化までを視野に入れた幅広い先見性・洞察力を有していると見られる。近年、東京大学では先端科学技術研究センター センター長、駒場オープンラボラトリー長を歴任しており、本研究領域のマネジメントを行うに適した経験・能力を有している。さらに、国内学会においては、電子情報通信学会フォールトトレラントシステム研究専門委員会委員長等を歴任しており、国外では世界最大の電気電子関連学会であるIEEEのフェローや、情報処理国際連合の第10技術委員会「コンピュータシステム技術」の副委員長を務め、国際的にも関連分野研究者から信頼され、公正な評価を行っていると見られる。

3. 研究総括のねらい

本領域は、デバイス、回路、VLSI、アーキテクチャ、システムソフトウェア、アルゴリズム／プロトコルの各システム階層における飛躍的な技術革新と、それらを統合するシステム技術の開発によって、スーパーコンピュータから携帯端末、組み込みシステムに至る多様な応用分野に適用可能な、情報システムの消費電力当たりの処理性能を従来の100倍から1000倍にする超低消費電力化技術の確立を目標とした。

情報社会の基盤として必然的に増加・拡大し続ける情報システム・ネットワークが消費する総電力量の爆発的増加を抑え、発熱増大や信頼性劣化に起因する情報機器の性能限界を克服することは、持続可能な社会に向けたエネルギー総需要抑制の視点だけではなく、産業技術の国際競争力強化の視点からも情報通信分野の科学技術が総力を挙げて挑戦すべき重要課題である、という認識を参加者全体で共有することがこの領域の出発点である。国の科学技術政策の方向に沿った戦略的目標の達成に研究者一人一人が責任を負うという意識と土壌を育てることが各チームの個別研究方針・計画のベクトルを領域の共通目標に向かわせる求心力として働き、結果的に優れた成果を生む可能性を高めることになる。

このため、CRESTとしては異例とも考えられる研究成果の数値目標を具体的に設定し、この数値目標の達成を領域運営の基本とした。3年間に渡る公募ではこの基本認識を強調し、選考の際にも、提案課題の内容と計画に加えて、この認識に沿った研究推進に対する姿勢と意思を重視した。

また領域終了時には、個別課題分野における要素技術の革新に加えて領域としての成果を説明するため、各課題の成果を総合したデモシステム（ULP統合システム）を構築して公開実験を行うことを当初から計画した。領域終了時点から5～10年程度における情報社会の姿と産業構造の形を見据えて領域の成果を最も効果的に説明できるULP

統合システムのイメージを描くために、領域アドバイザーとの合宿や公開シンポジウムを含めた検討会議を領域発足後2年間に渡って続け、その結果を3年目の研究課題選考に反映させた。また各チームのULP統合システムへの関与の仕方に関する検討は5年間に渡って継続し、初年度及び2年目選考課題の研究期間終了後のULP統合システムへの関与の仕組みに反映させた。こうした領域全体を巻き込むULP統合システムの検討、仕組み、予算措置を通じて、個別課題の革新的成果はもちろんのこと、異階層間の連携、異分野間の連携による科学技術イノベーションの創出を狙った。

4. 研究課題の選考について

- 1) デバイス、回路、VLSI、アーキテクチャ、システムソフトウェア、アルゴリズム／プロトコル、応用／サービスの各システム階層における飛躍的な技術革新
 - 2) 各階層を統合するシステム技術の開発
 - 3) 各階層で、情報システムの消費電力当たりの処理性能を従来の100倍から1000倍にする超低消費電力化技術の確立
- の3項目を分野選択の基本方針とした。

またこれらの分野の中で、

- 1) 実用化を視野に入れた目標達成への道筋を数値目標と共に明快に示す提案
 - 2) 領域としての成果を最大化するためシステムの各階層を越えた実質的な連携を可能にし、必要ならば産学連携を有効に活用できる研究体制の提案
 - 3) 目標達成が社会に与えるインパクトの可能性を実証できる提案
- を重視した。これらの選考方針は公募に際して明記している。

さらに、研究者・技術者の育成の観点から、必ずしも過去の研究実績を問わず、この分野の発展に大きく貢献する可能性のある研究者の提案も採択するように務めた。

研究領域の運営に当たっては、本領域に課せられた高い数値目標を達成するために、必要ならば個別課題の見直し、研究体制の変更、課題間の連携あるいは融合を求める場合があることを公募の際に明記した。

3年間で12チームの研究課題を採択した。デバイス／プロセスのレベルからアーキテクチャ、アルゴリズムのレベルまで、当初の狙いに近い分野分布になり、これまでの研究実績から現段階における我が国で最強チームによる領域構成ができたと考えている。但し、情報システムの低消費電力化を考えるに当たって重要だと考えられる分野が必ずしもすべて完全にカバーできたわけではない。例えば、ソフトウェア無線、情報圧縮、グリッド制御など、比較的システム上位層で抜けている分野がある。

また、領域中間評価で採択課題の構成に関して、「デバイス階層では主流技術がやや少なく、システム階層ではすでに主流のインターネット方式の性能向上だけでなくポス

トインターネットのビジネス世界をも見据えた、より野心的取り組みも望まれる」との指摘をいただいたが、すでに採択した 12 課題の目標や内容を大きく変更させるような指導・運営を行うには至らなかった。

なお、3年目に採択した市川チームの課題は、通常の研究課題とは異なり、本領域終了時の各研究課題の個別成果を統合した領域全体の成果がどのような形で社会的、産業的価値の創出に貢献し得るかを効果的に説明できる ULP 統合システムの姿を具体的に描き、成果公開シンポジウムで提示することを目的とした。多様なシステム階層に渡る個別成果を統合して可視化する研究、言わばメタ研究、を他の通常課題と同時並行的に実施するという困難な目標に挑戦したもので、従来の CREST 領域では例のない課題設定と実施形態であった。

5. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名	終了時の所属	役職	任期
石橋 孝一郎	電気通信大学 大学院情報理工学研究科	教授	平成 17 年 4 月～ 平成 25 年 3 月
岩野 和生	三菱商事株式会社	顧問	平成 17 年 4 月～ 平成 25 年 3 月
河辺 峻	明星大学 情報学部	教授	平成 17 年 4 月～ 平成 25 年 3 月
中島 浩	京都大学 学術情報メディアセンター	センター長／教授	平成 17 年 4 月～ 平成 25 年 3 月
古山 透	インターモレキュラージャパン株式会社	社長	平成 17 年 4 月～ 平成 25 年 3 月
三浦 謙一	国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系	教授	平成 17 年 4 月～ 平成 25 年 3 月
安浦 寛人	九州大学	理事／副学長	平成 17 年 4 月～ 平成 25 年 3 月
木村 康則	富士通株式会社 (米国駐在)		平成 17 年 4 月～ 平成 21 年 10 月
市川 晴久	電気通信大学 大学院情報理工学研究科	教授	平成 17 年 10 月～ 平成 19 年 3 月

本領域が狙いとするすべてのシステム階層をカバーするため、デバイス／プロセス分野、アーキテクチャ分野、ネットワーク分野、アルゴリズム分野のそれぞれにおいて我

が国を代表する実績のある研究者あるいは研究管理者の中から人選した。また大学の視点と企業の視点の両方をバランス良く確保することにも重きを置いた。結果として、領域を適切に運営するための最適な構成とすることができた。

期間途中で2名のアドバイザーがそれぞれの所属機関の事情により退任されたため、アドバイザー数は領域発足当時の9名から7名に減ったが、その時点ですでに公募期間は終わっており、領域運営も軌道に乗っていたので、補充する必要はないと判断した。

なお、アドバイザーの人選に当たって男女の区別はしなかったが、結果的には全員男性になった。

6. 研究領域の運営について

情報社会における低消費電力化を考える場合には、社会の持続可能性の視点からシステムのライフサイクルに亘る省エネルギー化を考える立場があり、その場合には、情報機器などの製造に要するエネルギーや回収・リサイクル等にかかるエネルギーも考慮に入れるべきとの考え方もあるが、本領域は「情報システムの超低消費電力を目指した技術革新と統合化技術」の確立を目的とするので、ネットワークを含む情報システムが定められたサービスを提供するために消費する電力に焦点を絞ることとした。すなわち、情報機器などの製造、回収、リサイクル等にかかるエネルギーまで考慮した最適化は対象としないことを領域発足時に確認し、アドバイザー、研究代表者の共通理解とした。

本領域は、デバイス、回路、VLSI、アーキテクチャ、システムソフトウェア、アルゴリズム／プロトコル、応用／サービスの各システム階層における飛躍的な技術革新と、それらを統合するシステム技術の開発によって、スーパーコンピュータから携帯端末、組み込みシステムに至る多様な応用分野で、情報システムの消費電力当たりの処理性能を従来の100倍から1000倍にする超低消費電力化技術の確立を目指しており、この戦略目標の達成に向けた研究を最短距離で推進することを運営の基本とした。その際、各チームが明確な数値目標を示してそれを達成することはもちろん、異なるチーム間においても積極的な交流を通じて低消費電力化に向けた問題点を共有するとともに連携してそれを解決することを重視し、領域全体としての成果達成への積極的な協力を全チームに求めた。

目標は、個別の研究課題でそれぞれの数値目標を達成することに加えて、領域全体の最終的な成果として、各課題の成果を総合したULP統合システムによる公開実験を行うことによって、本領域の戦略目標達成がエネルギー総需要の抑制と産業技術競争力の強化へ貢献できることを分かり易く示すことと定めた。

領域としてよりインパクトのある成果を示すため、領域発足から2年間は、様々な応用分野における情報システムの電力／エネルギー消費状況を調査するとともに、本領域

終了時点から5～10年程度で想定し得る情報社会の姿と産業構造の形を前提としたULP統合システムのイメージを描くため、領域アドバイザーと合宿を含めた検討会を重ね、2012年秋に公開デモを実施するULP統合システムの案を固めた。

また各チームのULP統合システムへの関与の仕方に関する検討は5年間に渡って継続し、初年度及び2年目選考課題の研究期間終了後のULP統合システムへの関与の仕組みに反映させた。こうした領域全体を巻き込むULP統合システムの検討、仕組み、予算措置を通じて、異階層間の連携、異分野間の連携による科学技術イノベーションの創出を期待した。

本領域に課せられた高い数値目標を達成するために、成果を最大化する最適な研究課題と最高のチーム編成で「バーチャル研究所」を構成することを目指した。年2回春と秋に開催する研究報告会では、研究代表者全員が進捗状況、数値目標のマイルストーン・チェック、今後の計画、数値目標達成への課題、最終成果のイメージなどを発表し、研究総括とアドバイザーがそれに対して質問、意見、助言をする形式で、その時点から最終目標に最短距離で到達するにはどのような方針と計画で研究を進めるべきかを議論した。また研究総括による個別のサイトビジットを地域ごとに実施し、各チームの研究環境と設備予算執行の状況の視察、チーム研究員との面談とフィードバックなどを行った。その結果、必要な場合には個別課題の計画見直し、研究チームの体制の見直し、目標設定の変更、課題間の連携、などの指導を適宜行い、必要な予算措置を実施した。

具体的には、個別に以下のような運営、助言、指導を行ってきた。

- 1) 異なるチームの研究課題に共通点がある場合に、両チームの連携、交流促進を助言
- 2) 共同研究者として企業技術者が含まれる場合に、その役割、責任の明確化を指導、およびプロセス条件変更に伴って必要となった追加予算を措置
- 3) 共同研究者が異なる機関に分散して異なるサブテーマを担当する場合に、シナジー効果を最大化するために最終イメージを統一するよう助言
- 4) 共同研究者が異なるサブテーマ、異なる概念、アプローチで研究を進めている場合に、各共同研究者間の連携と研究アイデアの体系的な共有を助言
- 5) 最終目標から見て計画に遅れが見られる場合には、研究内容、研究計画の見直しを指導。
- 6) 最終目標から見て採択時のチーム構成が最適でないと判断される場合に、目標達成に向けて最適化するために実施段階で構成を変更。さらに研究内容、研究計画の変更及び加速を指導。
- 7) 研究内容に照らして共同研究者のほかに副代表者を設置することが適切と判断される場合には副代表者の設置を助言。研究計画の変更と加速を指導。必要な予算を措置。
- 8) 2005年度、2006年度採択チームは、公式にはそれぞれ2010年度、2011年度で終了したが、2012年秋のULP統合システム公開実験へ繋げるための終了後の対策と研究

の継続の方法を助言し、必要な追加予算を措置。具体的には、2011年度に黒田チーム、小林チーム、佐藤チームの代表者と共同研究者を、2012年度にはそれに加えてさらに中村チームの代表者と共同研究者を、市川チームの共同研究者に加えて連携研究を推進するよう助言、指導。

9) 東日本大震災の影響で茨城県に所在する高木チームの集積回路製造装置が被害を受け、当初予定したチップ試作計画に大幅な遅延が生じたため、予算を組み替えて研究期間を1年間延長。

10) 領域の趣旨と目標に合致した ULP 統合システムの構成、設計、可視化、公開デモ方法等に関する指導、助言、予算措置など。

さらに、外部に対しては国際シンポジウムを含む以下の5回の公開シンポジウム・デモを実施し、成果の公開と外部評価のフィードバックを行った。

1) 2006年12月11日 研究戦略シンポジウム(東京大学駒場リサーチキャンパス) 情報システムの超低消費電力化技術がもたらす近未来の情報社会像を描くことによって、本領域が達成を目指す戦略目標の社会と産業への波及効果を展望するとともに、目標達成へ至る研究推進戦略を確認し、次年度の公募方針を明らかにした

2) 2008年12月8日 研究成果公開シンポジウム(日本教育会館一橋ホール) これまでに得られた中間的成果を公開するとともに、情報システムの超低消費電力化技術がもたらす近未来の情報社会像と産業創造へのビジョンを描くことによって、本領域が達成を目指す戦略目標の社会と産業への波及効果を明らかにした

3) 2010年11月26日 研究成果公開シンポジウム・デモ(秋葉原UDX) 2010年度が最終年度となる2005年度採択テーマの研究成果を中心に、各課題の成果報告とデモ展示を行った。また、課題別研究成果を総合した領域全体の成果の波及効果を説明するために、超低消費電力化技術によって創り出される5~10年後の情報社会の姿と産業構造の形を描いた ULP 統合システムの紹介とデモ展示を行った

4) 2011年8月1日 ULP 国際シンポジウム・デモ(福岡国際会議場) ULP 領域を国際的な認知と評価を得るために、国際会議 ISLPED (**International Symposium on Low Power Electronics and Design**) の会期中に同じ会場で 2011年度が最終年度となる 2006年度採択テーマの研究成果を中心に各課題の成果報告とデモ展示を ISLPED のプログラムの中で実施した。

5) 2012年11月30日 最終公開シンポジウム・デモ(品川コクヨホール) 本領域の7年間の成果の総括報告、2007年度採択テーマの研究成果を中心とする各課題の個別成果・連携成果の報告とデモ展示、ULP 統合システムのデモ展示、持続可能な情報社会へ向けての提言を行った。

特に、上記4)の福岡での国際シンポジウムは、領域中間評価において「評価の高い国際研究集会での特別セッション等を通じた成果の国際広報活動も求められる」との指

摘を踏まえて実施したもので、ULP 分野において世界をリードする 3 名の研究者

Prof. Kiyong Choi (Seoul National University)

Prof. Sachin Sapatnekar (University of Minnesota)

Prof. Vijaykrishnan Narayanan (Pennsylvania State University)

に本領域すべての研究課題の評価を依頼し、最終段階の領域運営にフィードバックした。

研究費の配分に関しては、初年度と 2 年目に採択した課題・チームが研究期間終了後に ULP 統合システム構築に関与する仕組みとして、終了チームのうち統合システムへの貢献が高いと見込まれるチームの研究代表者、共同研究者を ULP 統合システム構築に向けて 3 年目採択の市川チームの共同研究者として参加させ、異階層連携、異分野連携の研究を推進するための追加の予算措置を講じた。

加えて、黒田チーム、小林チーム、中村チームに対しては、いずれも ULP 統合システムに向けて期待以上の成果を得る見込みが出てきた時点で製造プロセス改良、チップ試作追加のために総括裁量経費を追加配分した。

これらの研究費追加配分は、領域中間評価で「各階層の最終目標への貢献度にもばらつきが見られるのは当然のことであるが、デモ企画の完成に向け予算面での選択と集中が望まれ、アドバイザーの指導力の強化が重要である」と指摘されたことに留意した結果である。

最終的に本領域の研究費総額 4,901 百万円のうち総括裁量経費が 10.6% (522 百万円) を占め、メリハリのある研究費配分を行えたと考えている。実際、最終年度(H24 年度)は、採択時計画予算額が 183,540 (千円) であったのに対して、総括裁量経費からの配分額は 201,980 (千円) であり、後者のほうが多くなっている。これらの予算措置は研究開始時に研究費の 10~15% 相当の総括裁量経費を確保したために可能になった。

7. 研究を実施した結果と所見

本領域に課せられた処理性能当たりの消費電力を 1/100 から 1/1000 に低減する数値目標は実際には極めて高いハードルであったが、多くの技術課題でこの水準に到達し、世界一あるいは世界初の研究成果として国際的に認められた。また、領域運営の狙いであった異なるシステム階層間の統合あるいは異なる技術分野間の連携がいくつかの研究課題で実施され当初に期待した以上の連携成果が生まれた。さらに、これらの個別成果、連携成果を総合して領域全体の成果がどのように社会的産業的価値を創出するかを説明する ULP 統合システムの姿を具体化して最終公開シンポジウムでデモ展示した。

これらの世界水準の成果の多く、特に異分野・異階層の連携成果、は領域中間評価時点ではまだ必ずしも予見し得なかったものであり、研究期間の後半で著しい進捗の見られたものが多い。最終的には全体として領域運営の狙いどおりに戦略目標が達成され、

極めて優れた成果をあげることができたと言える。

具体的には、領域全体を見た場合の特筆すべき成果は、次の5項目に分けられる。

1) JST 事業で初めての数値目標

情報システムの消費電力当たりの処理性能を5年間で従来の100~1000倍にする超低消費電力化技術を確立するという領域目標は実際には極めて高いハードルであったが、多くの研究課題がこの水準に到達した。数値目標を掲げることによって個別成果に対する責任意識が生まれて領域全体に浸透したことが良い成果を生む原動力になったと考えられる。

2) 世界一、世界初の個別成果

黒田チームは、磁気結合チャネル・チップ間通信で100mW/10Tbps（従来の1/1000）を達成し、結合共振クロック配信と合わせて三次元集積回路の基盤技術を確立した。偏波変調パルス方式端末間通信でミリ波帯送受信器として世界最小電力の81mW/10Gbps（従来の1/100）を達成した。オールモスト・デジタル無線の端末間通信でUWBトラシーバとして世界最小電力の0.41mW/100Mbps（従来の1/1000）を達成した。有機TFTによる寸法30×30cm²のワイヤレス給電シートで効率80%、最大40Wの伝送を達成し、有機TFTの消費電力は従来比1/1600を達成した。これらの成果は国際的にもトップレベルからさらに頭一つ抜け出した想定以上の成果であり、産業界へのインパクトも大きいと期待される。

小林チームは、ディスプレイ駆動用の薄膜トランジスタ(TFT)を「硝酸酸化法」で作製し、消費電力を従来の1/225に低減した。加えてシステム・回路レベルの技術革新でシステムディスプレイの消費電力をさらに1/10にすることにより、システム全体で従来比1/2000以下の低消費電力化を達成した。

佐藤チームは、光パッシブデバイスによるルーティングを用いた世界初の「低消費電力多階層光クロスコネクタノード」のプロトタイプ試作に成功し、敷設ファイバを使用した現場実験で、通信ノードにおけるビット当りの消費電力が従来の電気ルータ構成の1/100に低減されることを確認した。

後藤チームは、動画像、静止画、音声、テキスト等のマルチメディア情報を送受信するSoCにおいて、アルゴリズム、ソフトウェア設計、ハードウェア設計の最適化により、従来比で1/10から1/100まで消費電力低減を、ビデオエンコーダシステム（ISOCC2010優秀論文賞）、4k x 2kビデオデコーダLSI（ISPLED2010優秀設計賞）、人物検出STPエンジン（ルネサスと共同開発）などの試作チップの測定評価で実証し、それぞれ当該分野で世界一の電力性能比を達成した。

松岡チームは、開発したスパコンTSUBAME2.0が我が国初のペタフロップス性能を達成した。スパコンの性能を競うTOP500ランキングでは世界4位の演算性能と認定され、スパコンの省電力性能を競うGreen500ランキングでは省エネ性能に優れた運用スパコ

ン(Greenest Production Supercomputer)世界1位の認定を受けた。また、大規模実用アプリケーションである樹枝状凝固計算で 2.0PFlops 1468GFlops/Watt の省電力・高性能を達成し、HPC 分野で権威ある Gordon Bell 賞を受賞した。この成果は気象庁の次世代気象予報モデルや都市の大規模気流計算をはじめとする多数の実応用の省電力化に大きな影響を与えた。これらの実績をベースに 2016 年までに 2006 年に対し 1250 倍の電力性能比が実現可能であることを高い確度で実証した。

3) 異なる階層の統合成果

中村チームは、OS・アーキテクチャ・回路技術・デバイス技術の各階層を縦断する要素技術を開発し階層を越えた協調による電源制御(停止・低速)で消費電力を削減するシステム技術を確立した。MIPS-R3000 互換の汎用プロセッサ Geyser と大規模リコンフィギャラブルプロセッサ CMA を設計・試作し、Linux の安定動作に成功、1/10 の電力削減効果を実証した。CMA 単体では 200MOPS/mW の電力効率(従来比 100 倍)を達成した。

前述の小林チームによるシステムディスプレイ消費電力の 1/2000 低減の成果は、「硝酸酸化法」による薄膜トランジスタ(TFT)製造プロセスとシステム・回路技術という異なる階層を統合してシステムを試作した結果である

高木チームは、ニオブ 9 層最小接合寸法 $1\mu\text{m}$ の超伝導集積回路作製プロセスと、対応する論理設計支援ツールを開発し、従来プロセスに比べ動作速度 2 倍、回路面積 1/2 以下の単一磁束量子回路(SFQ)を実現した。 $1\mu\text{m}$ プロセスによる 2x2 再構成可能データパス(RDP)を試作し 45GHz での動作を確認し、同じく 4x4 RDP を試作して 50GHz での動作を測定する段階にある。これらは超伝導集積回路としては世界最大規模である。また、数値計算プログラムから大規模再構成可能データパスの再構成情報およびホストプロセッサ上のオブジェクトコードを生成するコンパイラを開発した。

前田チームは、バッテリー交換が事実上不要になる $1\mu\text{W}$ レベル(従来 1/100 - 1/1000)のユビキタス無線電力センサを開発し、大手コンビニ国内全店(約 14,000 店)へのモニタリングシステム実装を完了した。またデータセンタの低消費電力化制御に向けて仮想マシンを片寄せして瞬時(1秒未満)に実行ホストを切り替えて電源を落とす高速ライブマイグレーション機構を開発した。さらにユビキタスセンサを活用して排熱エネルギーを 60%削減するデータセンタ・モジュールを開発した。

4) 異なる分野の連携成果

黒田チームの磁気結合通信技術、無線給電技術と小林チームの保護膜形成技術、回路実装技術の連携で完全密封型恒久保存メモリ(デジタルロゼッタストーン)を試作し、その産業応用への可能性を示した。

黒田チームと中村チームの連携で、MIPS-R3000 互換の汎用プロセッサ Geyser と大規模リコンフィギャラブルプロセッサ CMA を 3 次元ワイヤレス結合した Geyser-CUBE を設計・試作して Linux の安定動作に成功し、三次元磁気結合積層クロック分配による三

次元積層システム LSI 実現の可能性を示した。

5) 領域全体の成果と波及効果

市川チームは、デバイスからソフトウェアまで多様なシステム階層に渡る個別成果を統合して社会的・産業的貢献に結びつける研究管理手法を提案し、本領域の成果統合として実践した。その結果としてシステム階層の異なるチーム間の連携を促進して前述の3次元 LINUX プロセッサやデジタルロゼッタストーンなどの顕著な連携成果を生み出した。また領域自体の目標であった ULP 統合システムの概念を Place & Play 型システムとして具体化し、5～10年程度で想定し得る産業応用への方向性を示すとともに、インフラ未整備の BoP 地域を対象とする地球規模の課題解決の可能性を提示した。

研究成果とは別に領域運営に関して、以下のような成果が得られた。

- 1) CREST 事業では異例の数値目標を掲げ、それを領域運営の基本とすることによって個別成果に対する責任意識が生まれ、それが領域全体に浸透したことが良い成果を生む原動力につながった。
- 2) 個別成果だけではなく、領域の最終成果を提示するための ULP 統合システムに対する各研究チームの貢献を当初から求め、研究者の理解が進んだ結果、期待以上の顕著な連携成果を生み出し、CREST 事業では初めてと思われる5年の研究期間を超えた研究者の関与と予算措置の試みの効果が実証された。
- 3) 本領域発足の前には存在しなかったシステム階層を上下に貫く低消費電力化技術の研究コミュニティが形成されつつあり、今後の CREST あるいはファンディングのあり方に一つの示唆を与えることが期待できる。

なお、困難な課題に挑戦したために本領域の終了時点ではまだ研究途上にあるが、将来性が見込まれ、大きな成果に繋がる可能性のある課題として以下のものが挙げられる。

- 1) 黒田チームの磁気結合無線通信技術を軸として、小林チームと連携した「デジタルロゼッタストーン」、中村チームと連携した「3次元積層コンピュータ」は、それぞれ最終公開シンポジウムで試作システムのデモ展示を実施した。まだ更なる実用化研究が必要であるが産業化の可能性を大いに期待できる。
- 2) 松岡チームの省エネ・スパコン(TUBAME)はすでに演算性能において世界4位、省エネ性能において世界1位として国際的に認定されたが、実績データを基に2016年までに2006年に対し1250倍の電力性能比が実現可能であると予測している。その結果は次世代のエクサスケール・スパコンの実現可能性に繋がることを期待できる。
- 3) 高木チームの超伝導 SFQ 回路技術は、現状では CMOS 技術を越える実用技術に育つ可能性は依然として不明であると言わざるを得ないが、 $1\mu\text{m}$ の SFQ 回路作製プロセスとパルス論理設計環境では現時点で世界最高水準に達しており、大規模回路設計、タイミング精度向上、信頼性などの実用化に向けた課題が解決し、 $0.5\mu\text{m}$ 程度の SFQ 回

路プロセスが確立されれば、10 テラフリップス級デスクサイド・コンピュータの実現可能性が期待できる。

情報システムの低消費電力化技術は、デバイスからソフトウェアまで多階層に渡る総合技術であり、すべての技術がバランス良く進歩することによって初めて、性能当たりの消費電力は減少する。本領域の各階層の研究が今後さらにバランス良く進歩すると、現在は高レベルにあるシステムの消費電力は時間軸に対して単調減少のカーブを描く。一方、その間に無線給電技術も順調に進歩すると、現在は低レベルにある無線給電能力は時間軸に対して単調増加のカーブを描く。この消費電力カーブと給電能力カーブが交差する時点が時間軸上に存在し、この時点で情報システムに電力を供給する電源線は必要なくなる。すなわち、情報システムは非接触の無線通信のみで稼働する環境が実現し、新しい社会的・産業的価値が創出されることになる。この状態の創出が市川チームの提示した“Place & Play”型の ULP 統合システムのイメージであり、本領域の目指した科学技術イノベーションである。

8. 総合所見

ネットワークで生産され流通するデータ量の指数関数的増加がもたらす社会の消費電力・消費エネルギーの増加とマイクロプロセッサの性能向上を阻むデバイス消費電力の増加が 21 世紀に入って意識され始めた。それとほぼ時期を同じくして、具体的な達成目標として「消費電力あたりの処理性能を 100 倍から 1000 倍にする超低消費電力技術の確立」を掲げる本領域が立案されたのは時宜を得たものであった。また、それまで低消費電力化は主としてデバイス分野の課題と考えられていたが、むしろアーキテクチャやソフトウェアなどシステム階層の上位レベルの課題であるとの認識から、「デバイス技術、回路技術、アーキテクチャ、VLSI 技術、システムソフトウェア技術の各技術分野における技術開発、および、それらを統合した技術開発」に本領域の狙いを定めた。

この領域が設定された意義は極めて大きい。この領域発足前には、例えばネットワークの研究者、技術者は、通信性能、信頼性、安全性には関心があっても、消費電力への関心はほとんどなかったと言って良い。実際、名大の佐藤教授はこの領域に参加することによって、世界でもいち早くネットワーク分野で低消費電力化技術に取り組んだ研究者として多くの国際会議から招待講演を依頼された。

本領域の実施は情報システムの上位階層における低消費電力化の重要性を広く認識させるきっかけになった。事実、本領域が発足してから、国内外で低消費電力、省エネルギーを目的とした「グリーン XXXX」プロジェクトが次々と立ち上がっている。

「情報システム・ネットワークの低消費電力化」は本領域が先駆者であるが、5年間ですべてが解決されるような課題ではなく、今後の研究継続が必要なので、他のプログラムとの省庁を超えた連携も含めて本領域終了後の継続の仕組みを考え、その実現を関係方面に働きかける必要があったと感じている。残念ながら研究総括としてそこまでの科学技術政策に関する政治力を持ち合わせていなかったが、幸いにも本領域に参加して今後に期待が持てると思われる課題に関しては、研究者が個別に経産省や文科省の他の大型プロジェクトに引き続き参加して研究を発展させる状況が生まれている。

2011年3月11日に起きた東日本大震災と福島原発事故は省エネルギー化、低消費電力化に対する社会の意識を大きく変えたが、本来ならそこで科学技術の立場から大きな役割を果たすべき本領域はすでに終盤に差し掛かっていたため、運営方針を大きく変更することはなかった。それでも個別には「3.11後」を意識して研究を進める例がいくつか見られた。例えば、西川チームはデータ駆動型アドホックネットワークに適した応用分野として災害時の緊急連絡ネットワークに焦点を絞って社会的波及効果を評価した。また松岡チームは、開発したスパコン節電運用システムを東工大TSUBAME2.0の節電運用に活用し、東京電力管内の大口ユーザーである東工大情報処理センターの震災後における効果的な節電に貢献した。

課題の選考に当たっては、デバイスからアルゴリズムまでのシステム階層を上下に貫く連携を重視した結果、特徴的な課題が分野のバランス良く採択された。研究代表者のこれまでの実績から現時点で我が国における最強メンバーによる領域構成が実現されたが、情報システム・ネットワークの超低消費電力化技術に関わる技術分野は非常に広範囲に渡り、採択した12チームがそのすべてをカバーするには至らなかった。領域中間評価では、「採択課題ではデバイス階層での主流技術項目が相対的に少なく、反面、システム階層ではオーソドックスな取り組みが目立つ。各階層で今回採択していない“代替技術”も日々進歩しており、採択技術の相対的改善だけでなく代替技術との比較も忘れてはならない」との指摘を受けたが、必ずしも十分に領域運営に反映させることはできなかった。

領域運営の基本は数値目標の進捗管理であり、これまでの学術振興会による科研費特別領域研究においてはもちろん、CRESTをはじめとするJST戦略的創造研究推進事業においても極めて異例の研究管理方法であるが、研究者が最終成果に責任意識をもって研究を実施するようになった効果は大きい。このことが結果として最終的に優れた成果を生むことになったと考えられる。

領域運営のもう一つの柱は、個別の研究課題でそれぞれの数値目標を達成することに加えて、領域全体の最終的な成果として、各課題の成果を総合したULP統合システムによる公開実験を最終シンポジウムで実施することとしたことである。領域発足から2年間はULP統合システムのイメージを描くために領域アドバイザーと合宿を含めた検討会を重ねた。また5年間に渡って各チームのULP統合システムへの関与の仕方に関する

検討を継続し、初年度及び2年目選考課題の研究期間終了後の ULP 統合システムへの関与の仕組みに反映させた。ULP 統合システムに対する各研究チームの貢献を当初から求め、研究者の理解が進んだ結果、期待以上の顕著な連携成果を生み出すことができたと考えている。CREST 事業では初めてと思われる5年の研究期間を終了した研究者を ULP 統合システムのために引き続き2年程度関与させるための仕組みと予算措置の試みが今後のファンディングシステムの実効性改善に向けて一石を投じることになるかもしれない。

研究を実施した成果は極めて大きい。処理性能当たりの消費電力を従来水準の1/100から1/1000に低減する数値目標は実際には極めて高いハードルであったが、多くの技術課題でこの水準に到達し、世界一あるいは世界初の研究成果として国際的に認められた。それらのうち、磁気結合チャンネルのチップ間通信、偏波変調パルス方式の端末間通信、オールモスト・デジタル無線の端末間通信、有機 TFT によるワイヤレス給電シート、硝酸酸化法によるディスプレイ駆動用 TFT、光パッシブデバイスによるネットワークルーティング、情報圧縮したマルチメディアチップ、電力性能比で世界1位のスパコンなどの成果は特筆に値する。

システム階層を越えた連携は当初から募集要項に掲げた本領域の方針の柱であり、優れた成果が得られた。なかでも、OS・アーキテクチャ・回路技術・デバイス技術の各階層を縦断した協調による電源制御で消費電力を削減する LINUX 汎用プロセッサ、TFT 製造プロセス技術とシステム設計技術の連携によるシステムディスプレイ、ニオブ9層1 μm 超伝導集積回路作製プロセスとパルス論理設計支援技術が連携した世界最大規模の超伝導 SFQ 集積回路、バッテリー交換不要の1 μW レベル無線電力センサを用いた電力モニタリング社会実験と省エネデータセンター開発は特筆に値する。

もう一つの本領域の重要な方針は最終的な ULP 統合システムに向かう異なる研究分野・チームの間の連携であり、研究者の意識共有が進んだ結果、期待以上の連携成果が生まれた。その中で、磁気結合通信技術と硝酸酸化保護膜形成技術とウェーハスケールメモリシステム技術が連携した完全密封型恒久保存メモリ（デジタルロゼッタストーン）の試作、磁気結合通信技術とアーキテクチャ技術と OS 技術が連携した積層クロック分配による三次元積層システム LSI の試作は特筆に値する。

本領域運営の最大の特徴は ULP 統合システム構築へ向けた研究マネジメントにある。本領域の終了時点で達成されている各研究課題の個別成果を統合した領域全体の成果が領域終了後にどのような形で社会的、産業的価値の創出に貢献するかを説明できる ULP 統合システムの姿を具体的に描き、領域最終年度の成果公開シンポジウムで提示することをミッションとする特別な研究課題を設定した。本領域で実施しているデバイスからソフトウェアまで多様なシステム階層に渡る個別研究課題の成果を統合して可視化する研究、言わば、メタ研究を本領域の中の一課題として他の通常課題と同時並行的に実施するという極めて困難な目標に挑戦したものであり、従来の CREST 領域では類例

のない課題設定と実施形態であった。この課題目標に対して、個別課題に取り組む複数の異なる研究チームの成果を統合する研究管理手法を提案して実践したこと、その結果としてシステム階層の異なるチーム間の連携を促進して3次元 LINUX プロセッサやデジタルロゼッタストーンなどの顕著な連携成果を生み出したこと、領域自体の目標であった ULP 統合システム概念を” Place & Play” 型システムとして具体化して産業応用への方向性を示し、BoP 地域を対象とする地球規模の課題解決の可能性を提示したことは特筆に値する。

総合所見をまとめるにあたり、我が国のファンディングシステムに関して抱き続けてきた考えを述べたい。JST の戦略的創造研究推進事業の一つである CREST は、ボトムアップ型の科研費とは異なって、いわばトップダウン型の研究推進を行うべきとされている。従って、研究者の多い分野へ投資するだけでなく、現在は研究者が少ないが国の科学技術政策上重要であると判断された分野へは、むしろ研究者を誘導して新たな研究者コミュニティを創るような施策が必要である。言うまでもなく研究投資が最大の効果を得るために研究者の自由な発想を可能にする環境が重要であるが、目標設定が要らないということではない。このことが研究者の間でも必ずしも理解されていない面があり、また政策担当者やファンディング機関にも応募研究者が少ない分野への投資を避ける傾向が見られる。実際、本領域が募集を開始した 2005 年には数値目標を基本とした領域運営方針が十分に周知されなかったためか、多くの応募があった。しかし、2 年目、3 年目には、本領域の数値目標を掲げた運営方針が知れ渡った結果、応募者数が激減した。また、当時、応募者が少ない戦略目標を設定することは JST 自身の評価にとってマイナスになるのではないかと心配する声が JST 内部にもあったと聞く。トップダウン型の戦略研究推進事業では、たとえ研究者が少なくても国として強化すべき分野に集中的に投資すべきである。それによって研究者をそのような重要分野へ誘導すべきである。そのためには、現在のように募集告知から応募締め切りまでが 2 ヶ月程度では短すぎる。研究者にとってこのような短期で分野を変更することは不可能であり、表面的な装いを修正だけで中身は従来とほぼ同じ提案書を書かざるを得ない。研究者を真の意味で重要分野へ誘導するためには、分野の予告期間は少なくとも 1 年間、望ましくは 2 年必要である。その場合、科学技術政策の立案者、担当者の長期的な先見性も問われることになるのは言うまでもない。本領域で実施した数値目標を基本とする運営は CREST としては異例であったが、我が国のファンディングシステムの改革へ向けた議論のきっかけになることを願っている。

最後に、研究期間を終了した初年度、2 年度採択の研究者が ULP 統合システム構築に向けて領域の最終年度まで関与することを可能にする予算措置の提案に対して柔軟な対応をいただいた JST の判断に敬意と感謝の意を表します。

以上