

(独) 科学技術振興機構  
戦略的創造研究推進事業  
平成 21 年度 研究領域中間評価用資料

「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」

2010. 4. 12

## 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

情報通信機器が高性能化するにしたがい、消費電力の増大が大きな問題になりつつある。例えば、現在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は原子力発電所 1 基並みの電力が必要となり、また、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)に達してしまうと言われている。また、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・高機能化が継続するだけでなく、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は、以下のようなものが考えられる。

#### (1) 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

(2) 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

(3) 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非常に重要であり、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を開発することで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、産学協同体制により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、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ものです。

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ます。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しています。

## 3. 研究総括

南谷 崇 東京大学 大学院 情報理工学研究科 教授

#### 4. 採択課題・研究費

(百万円)

| 採択年度       | 研究代表者  | 中間評価時<br>所属・役職         | 研究課題                                                        | 研究費*    |
|------------|--------|------------------------|-------------------------------------------------------------|---------|
| 平成<br>17年度 | 黒田 忠広  | 慶應義塾大学 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                                 | 517.0   |
|            | 小林 光   | 大阪大学 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                                | 428.4   |
|            | 佐藤 健一  | 名古屋大学 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                                     | 367.5   |
|            | 高田 広章  | 名古屋大学 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<br>18年度 | 小池 帆平  | (独)産業技術総合研<br>究所 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 教授               | 超低消費電力メディア処理 SoC の研究                                        | 363.0   |
|            | 高木 直史  | 名古屋大学 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                                | 462.0   |
|            | 中村 宏   | 東京大学 准教授               | 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                            | 451.8   |
| 平成<br>19年度 | 市川 晴久  | 電気通信大学 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                                | 505.0   |
|            | 西川 博昭  | 筑波大学 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<br>究所 上席研究員 | 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                            | 418.0   |
|            | 松岡 聡   | 東京工業大学 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<br>ハイパフォーマンスコМПユータィング | 276.2   |
|            |        |                        | 総研究費                                                        | 4,603.0 |

\* 研究費：平成21年度上期までの実績額に平成21年度下期以降の計画額を加算した金額

## 5. 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ている。

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と考えている。

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ている。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、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計画している。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年間に渡って続けてきた。各チームの ULP 統合システムへの関与の仕方に関する議論は現在も継続している。

## 6. 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

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、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ているわけではない。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まだ抜けている分野が見られる。

## 7. 領域アドバイザーについて

| 領域アドバイザー名 | 現在の<br>所属                        | 役職          | 任期                           |
|-----------|----------------------------------|-------------|------------------------------|
| 石橋 孝一郎    | 株式会社ルネサステクノロジ<br>システムソリューション統括本部 | 部長          | 平成 17 年 10 月<br>～平成 25 年 3 月 |
| 岩野 和生     | 日本アイ・ビー・エム株式会社<br>ソフトウェア開発研究所    | 執行役員／<br>所長 | 平成 17 年 10 月<br>～平成 25 年 3 月 |
| 河辺 峻      | 明星大学 情報学部                        | 学部長         | 平成 17 年 10 月<br>～平成 25 年 3 月 |
| 中島 浩      | 京都大学 学術情報メディアセンタ<br>ー            | 教授          | 平成 17 年 10 月<br>～平成 25 年 3 月 |
| 古山 透      | 株式会社東芝 技術企画室                     | 室長          | 平成 17 年 10 月<br>～平成 25 年 3 月 |
| 三浦 謙一     | 国立情報学研究所                         | 教授          | 平成 17 年 10 月                 |

|       |               |           |                               |
|-------|---------------|-----------|-------------------------------|
|       | アーキテクチャ科学研究系  |           | ～平成 25 年 3 月                  |
| 安浦 寛人 | 九州大学          | 理事<br>副学長 | 平成 17 年 10 月<br>～平成 25 年 3 月  |
| 木村 康則 | 富士通（米国）       |           | 平成 17 年 10 月<br>～平成 21 年 10 月 |
| 市川 晴久 | 電気通信大学 電気通信学部 | 教授        | 平成 17 年 10 月<br>～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。

これまでに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名から現在7名になっているが、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るので、補充する必要はないと判断している。

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ている。

## 8. 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っている。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ている。

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ている

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である。

このため、領域発足から2年間は、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 年秋に公開デモを予定する ULP 統合システムの案を固めた。

本領域に課せられた高い数値目標を達成するために、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ている。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ている。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ている。

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と異なる概念、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世知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 年度チームはそれぞれ 2010 年度、2011 年度で終了するが、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する予定など。

## 9. 研究の経過と所見

直接的な狙いである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るが、いくつかの個別技術課題のレベルでは、すでにこの目標に到達しているものも見られる。また、終了時点の目標到達へ向けて順調な進捗状況を示している課題もいくつかあり、数値目標に対する領域全体の進捗状況は概ね順調である。しかし、現状のままでは目標達成の見通しがまだ立たない課題もいくつかあり、これらは研究計画を抜本的に見直す必要がある。

一方、数値目標を掲げることによって生まれる個別成果に対する責任意識については、狙いどおり、領域全体に浸透してきており、これが今後の良い成果を生む原動力につながることが期待される。

また、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理解も進みつつあり、またそれへの協力意欲も見られるようになってきているなど、5年の研究期間を超えた予算措置の試みの効果が期待できる状況になってきている。

さらに、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も形成されつつあり、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。

領域全体を見た場合の現段階での特筆すべき成果は、黒田チームが磁気結合チャネルを用いて非接触でチップ間通信を行うチップ間磁気結合、数メートルまでの無線通信を行う端末間至近距離通信、数メートルから 100 メートルの無線通信を行う端末間短距離オールモスト・デジタル無線の3つの課題でいずれも世界最高水準の成果を出して最終目標レベルに近づいており、特にオールモスト・デジタル無線では最終目標レベルにすでに到達していることである。また当初計画になかった給電シートと整合する通信システム「通信シート」を新たに提案・実証し、新たなシナジー効果も出てきている。ISSCC に 2006 年から 20010 年まで毎年論文を発表しているほか、VLSI シンポジウム、IEEE JSSC などにも常に発表し、国際的にもトップレベルから頭一つ抜け出した想定以上の成果を出している。実用化へ向けた企業との協力も進めており、産業界へのインパクトも大きいと期待される。

また、佐藤チームでは、新しい光ネットワークアーキテクチャの提案に加えて専用デバイスの試作も着実に進んでおり、研究は計画通りに順調に進んでいる。企業との連携も密で成果もあがっている。世界への発信、知財の権利化も積極的に進めており、国際的な評価も高い。

一方、当初 1/100 の電力削減を目指したが、技術環境の変化もあって試作チップの電力削

減効果が当初期待したレベルに達していないこと、当初想定した研究計画から遅れていること、当初想定した民間企業との技術協力が必ずしも順調に進んでいないことなどから、現在、研究計画と予算の見直しを進めているチームもある。

領域全体としては数値目標の完全達成あるいはそれに近い水準の達成が概ね期待できると言えるが、まだ研究開始から2年半しか経過していない 2007 年採択チームのいくつかの課題には進捗状況に懸念があり、今後、個別に研究の内容、計画、体制まで踏み込んだ議論と助言が必要である。

今後の領域全体との課題としては、2010 年度で終了する 2005 年度採択チームおよび 2011 年度で終了する 2006 年度採択チームの研究成果とその後の活動を 2012 秋の ULP 統合システム公開実験にどのように繋げていくか、という領域運営上の問題がある。各チームの研究成果を ULP 統合システムに取り入れるためには、当該チームの研究者が直接関与する体制を取らない限り成功しないので、研究年度を超えた予算措置と人員配置をどのように実効ある形で実現するか、今後各チームと議論しながら領域として詰めていく必要がある。

2010 年度から研究総括の所属機関が変わることに伴って、これまで東大先端研正門横のマンションに設置していた領域参事の事務所を撤収し、3番町ビル内に移転した。このことが今後の領域運営にどのように影響するかはまだ分からない。

## 10. 総合所見

2005 年度採択の4チームと 2006 年度採択の4チームの中間評価を終えた段階での研究領域としての成果見通しは、概ね順調であり、終了時点では社会的、産業的インパクトのある成果が期待できる。しかし、一部の個別課題に関しては、環境条件の変化などもあって当初の計画から相当の遅れが見られるため、今後、研究内容、計画、体制の早急な見直しが必要である。

領域全体の最終成果デモとしての ULP 統合システム公開実験は未体験の新しい試みであり、各チームの研究期間を超えた協力体制とその予算措置も含めて、今後の課題である。

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、バランスのとれた課題が採択された。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ているが、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すべての技術分野をカバーするには至っていない。

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ることが期待される。

ULP 統合システムの公開実験のために、既に終了した研究者を2年程度つなぎ止め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。

この領域を設定し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ている。

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る必要があると思われる。

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はなく、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。本領域で設定している数値目標は CREST としては異例であるが、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。

以上