

# CREST 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」 追跡評価報告書

## 総合所見

本研究領域は、情報通信システム・ネットワークにおいて、デバイス、回路、集積システム、アーキテクチャ、システム・ソフトウェア、アルゴリズム、応用・サービスなどの各階層における革新的要素技術の開発と階層統合的な管理・制御・最適化により、既存技術を圧倒的に(2桁から3桁)凌駕する革新的技術の開発に取り組んだ。

本研究領域で扱われた多数の低消費電力化要素技術の中で、特に TCI (ThruChip Interface)、革新的電源制御、ハイパフォーマンスコンピューティング技術の各テーマに代表例示されるように、イノベーション源の発掘およびこれらに重要な初期的進展を与えた本研究領域の意義・価値は大きい。本研究領域の研究成果が、CREST や ACCEL などの大型研究プロジェクトや NEDO の大型開発プロジェクトへの展開のベースとなり、これらを介して実用化・事業化につながる構図ができつつある。

研究成果の評価指標として一般的に用いられる、研究助成金獲得状況や論文発表数ならびに特許出願・登録数および各種受賞歴については良好であり、本研究領域の各研究課題に関して、課題ごとのばらつきはあるものの、研究期間終了後に各研究代表者が本研究成果の発展研究に関して獲得した一千万円以上の助成金の総件数は 35 件、研究期間終了後に発表した論文の総数は 154 報(期間中:366 報)、研究期間終了後に出願した特許の総数は国内 30 件(登録 10 件)、海外 17 件(登録 10 件)(期間中は国内 38 件出願、海外 14 件出願)となっている。また研究成果の科学的インパクトを示す一つの指標となる各種受賞では、全ての研究課題において受賞歴があり、研究領域全体で 42 件となっている。

さらに、超低消費電力高性能計算技術では Green500 において世界最高を獲得した TSUBAME3.0 の開発に直結し、超低電力高性能システム LSI の研究成果は米国 DARPA が同趣旨で追随し、また気象予報プログラム ASUCA は世界的標準の気象モデルである WRF を凌駕しているなど、国際的に高い水準にある研究が行われてきたことが認められる。

一方、実社会における中核技術として活用されるためには、超低消費電力システムとしての統合化技術や大規模社会実装に向けた取り組みが必要である。本格的な IoT・AI 時代を向え、本研究領域で開発された技術の重要性は研究終了時よりもむしろ高まっており、この点において今後のより一層の展開を期待する。

## 1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域の各研究課題は、研究期間中や研究期間終了後も情報システムの超低消費電力化に果敢に取り組んでいる。程度の差はあるが、いずれの研究課題についても研究の継続ならびにその発展過程において、数多くの良好な研究成果が継続的に得られている。

研究成果の継続ならびに発展・展開が活発に行われていることは、各研究課題での研究成果に基づく新たな研究プロジェクトの実施状況より確認することができる。例えば、磁気結合チャネルを用いたチップ間通信(TCI: ThruChip Interface)技術は、CREST 研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」および「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」の各研究課題における重要要素技術として展開研究が実施されているほか、ACCEL や NexTEP の実用化を見据えた応用研究開発プロジェクトに発展した。また、超低消費電力高性能計算(ULP-HPC: Ultra Low Power-High Performance Computing)技術についても、従来の CPU を中心とした方式から GPU を用いた並列処理方式へと転換する技術潮流を生みだし、電力効率のよい高性能計算機の性能を評価する Green500 において世界最高を獲得した TSUBAME3.0 の開発に直結している。本研究領域の研究課題は多岐に渡るため、その中から代表的な研究課題について記述する。

「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」に関しては、磁気結合チャネルによりチップ間通信を実現する革新的な新規概念を提案し、テストチップにてシリコン上で実証を行った。IEEE システム LSI 技術賞、半導体集積回路研究開発に関する世界最大の国際学会 ISSCC(International Solid-State Circuits Conference)最多論文賞などの各種の学会賞などを数多く受賞し、国際的にもその独創性は高く評価されている。本研究領域の研究成果は実用化に向けた研究プロジェクトに引き継がれ、継続的な発展が見込まれている。一方、本技術を活用した大規模省電力スーパーコンピュータの開発プロジェクト(NexTEP)では、本技術を実機で使用するには至らなかった。実使用に向けた今後の更なる研究展開が期待される。

「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」に関しては、細粒度パワーゲーティングによる低消費電力化を実現した。間欠動作による低消費電力化について、センサノードなどに実際の境界条件を入れて効果を実証したことは大きな研究成果であり、実用上の追従も始まっている。この技術は、ノーマリオフコンピューティングの研究発展の潮流となり、また、データ処理のタイミングだけでなく物理的な場所も制御する時空間データ制御実行モデルへと発展している。一方、細粒度の電源制御は、OS あるいはこれに準ずるレベルの抜本的改変を前提としないと、容易に一般的に作りこめない性格を持っている。本技術の社会的普及力を上げるために、OS やシステム・ソフトウェア層との連携した取り組みが望まれる。

「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」に関しては、10 年で GPGPU システムを構築し、1000 倍/10 年の電力効率化を達成している。また、研究成果は TSUBAME シリーズとして性能向上を続けており、期待通りの成果をあげ続けている。Intel, NVIDIA 社と協働し国際的なプロジェクトとして発展を続けており、エクストリームビッグデータ時代に必須の技術となっている。また、気象予報アプリの開発や、昨今の機械学習等の応用分野拡大にも役立てられている。

## 2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

### (1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

本研究領域からは、国際的にも高く評価されている多くの研究成果が生まれており、科学技術の進歩への貢献は大きい。新規概念の提案と実証や、新しい技術潮流の創出などの具体例を以下に示す。

磁気結合チャネルを用いたチップ間通信(TCI: ThruChip Interface)技術は、3次元集積回路を実現するための基盤技術となり得る革新的な研究成果である。研究期間中にはデータ転送効率として 100mW/10Tbps を達成し、従来技術に比べて消費電力を 1/1000 に低減することが可能であることを実証した。磁気結合チャネルの考え方をボード間接続に発展させ、TLC (Transmission Line Coupler)技術を開発した。TCI, TLC 共に、世界最高水準のエネルギー効率を達成しており、国際的に見ても突出した性能を示している。

超低電力高性能システム LSI の研究では、細粒度パワーゲーティング技術の研究開発を行い、ノーマリオフコンピューティングという低電力コンピューティングの潮流を創り出した。間欠動作によるシステム低消費電力化技術は、今後の IoT 社会の設計においてますます拡大適用されるものと期待される。通信系に重きを置いてはいるが、米国の DARPA プロジェクトも同趣旨で追随していることも特筆すべきである。

ハイパフォーマンスコンピューティングに関する研究開発は、多数の GPGPU と CPU を搭載し、性能および電力効率で世界のトップレベルを維持し続ける研究成果をあげており、CPU を用いた並列計算方式の限界に挑戦する研究開発として評価できる。今後は本方式のスケラビリティを発揮した一層の発展が望まれる。また、メニコア/GPU を活用するソフトウェア技術は、NVIDIA が開発した GPU 向けの汎用並列コンピュータプラットフォームおよびプログラミングモデルである CUDA が整備されていない頃から手掛けられていたこともあり、気象予報プログラム ASUCA は世界的標準の気象モデルである WRF (Weather Research and Forecasting) の実行速度を凌駕している。さらに、フィンテックなどの経済情報、遺伝子解析、創薬研究、自然災害シミュレーションなどの社会シミュレーションは人間の社会にかかわる新分野を切り開いた。

### (2) 研究成果の応用に向けての発展状況

本研究領域から生まれた多くの研究成果において、成果の実証や応用に向けた活発な取り組みがなされている。そのうちのいくつかは、社会的、経済的な波及効果が目に見える形で具体的に現れている。その具体例を以下に示す。

磁気結合チャネルを用いたチップ間通信(TCI: ThruChip Interface)技術は、大規模省電力スーパーコンピュータのプロセッサやメモリの積層技術としての採用が検討されていた。本研究成果の応用により可能となる 3次元集積回路は、エレクトロニクス機器の高性能化、通信の高速化、省電力化を強力に推し進めるため、著しい社会的および経済的な波及効果を期待できる。今後の一層の実用化努力を期待する。

超低消費電力高性能計算 (ULP-HPC: Ultra Low Power-High Performance Computing) 技術においては、GPGPU を用いた超並列計算方式の演算性能並びにエネルギー効率性能が著しく高いことをスーパーコンピュータ TSUBAME の継続的開発を通じて実機にて実証し、GPU を超並列的に使用する世界的な技術潮流を作り出した。本方式により、気象予想計算をはじめとする環境・災害・健康医療などの各種シミュレーションの高度化が図られている。GPGPU を用いた ULP-HPC は、近い将来、著しい発展が見込まれる深層学習 (Deep-Learning) を初めとする各種 AI 技術の超高速低消費電力実行に不可欠の技術になるものと思われる。ULP-HPC による大規模高速並列処理は、AI 技術の発展にとどまらず、フィンテックなどの経済情報、遺伝子解析、創薬研究、自然災害シミュレーション、大規模高精度天気予報など、人類の社会、医療、健康、安全などの幅広い分野の進展に大きく貢献するものと期待される。

ソフトウェアとハードウェアの協調による組み込みシステムに関する研究は、車載システムへの応用に展開しており、実用化が加速しつつある自動運転技術の開発に大きく貢献すると期待される。具体的には、研究代表者はベンチャー企業を設立し、国際標準規格に基づく国産の車載システム向け SPF (ソフトウェアプラットフォーム) にも取り組んでいる。既に国内の自動車部品メーカーが SPF を用いた製品の開発に取り組んでおり、近い将来に国内メーカーによる自動制御システムの標準的プラットフォームとなることが期待されている。

ユビキタスセンサに関する研究は、グリーンセンサネットワークシステムへと発展し、大規模システムでの実証実験が行われた。コンビニエンスストア、製造ライン、商業施設、オフィス、植物向上、クリーンルーム、精密部品工場などに適用され、10 % 以上の省エネ効果を示すなど実際の社会においてグリーン化を促進できる可能性を示している。

システムディスプレイの超低消費電力化に関する研究は、SiC パワーデバイス、結晶シリコン太陽電池の開発技術、シリコン切粉のリサイクル技術などに大きく発展している。SiC パワーデバイスは、電源電圧変換、モーターの速度制御に用いられるインバータの性能向上や活用範囲向上に貢献すると期待されている。また、太陽電池に関する応用は、発電コストの低減に貢献する研究成果であり、ベンチャー企業を設立し大規模太陽光発電所を建設するなどの実用化を進めており社会的にも関心を集めている。シリコン切粉のリサイクル技術は、シリコンウェーハ生産時に発生するシリコン切粉をリチウムイオン電池負極材料にリサイクルする技術であり、リチウム電池の需要に応える技術として注目されている。

### (3) その他の特記すべき波及効果

その他の特記すべき波及効果として、本研究領域における研究成果の展開が、新規概念の計算機アーキテクチャ創出につながった例、産業界を巻き込んだ標準化技術の開発と普及活動に結びついた例、当初想定外のデバイスの特性向上に結びついた例などがある。

「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」で開発された TCI 技術

は、「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」の発展課題である「誘導結合を用いたビルディングブロック型計算システムの研究」における基幹的な要素技術として活用されている。TCI という画期的な回路技術により、ビルディングブロック型計算機システムという新しい計算機アーキテクチャが生まれており、今後の大きな技術潮流となることが期待される。

「ソフトウェアとハードウェアの協調による組み込みシステムの消費エネルギー最適化」では、車載組み込みシステムにおける車載データ統合アーキテクチャやデータ集約型車載組み込みシステムを開発した。研究代表者等は、これらの研究成果に基づいて車載用組み込みソフトウェア OS の開発に取り組んでいる。特に、欧州発の車載 ECU 向けソフトウェアプラットフォーム (AUTOSAR) に準拠したソフトウェアプラットフォームの開発と普及に注力しており、名古屋大学大学院情報科学研究科附属組み込みシステム研究センターの設立や、ベンチャー企業 APTJ の設立など、産学を巻き込んだ形でオープンイノベーションに向けた研究開発を推進している。研究代表者等の実施する組み込みシステム技術者教育は、大学主催のオープンな講座開設につながり、いわば名古屋地域特有のエコシステム形成に大きな貢献をしている。オープンな環境で研究開発と教育を融合させ、産業界への出口としての研究成果をも実現している希少な例である。

「微細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」に関する研究は、低リーク電流特性を有する薄膜トランジスタ (TFT) をシステムディスプレイに応用する研究であるが、TFT ゲート酸化膜形成に用いる硝酸酸化法等の技術が、SiC パワーデバイスの薄膜形成技術、結晶シリコン太陽電池の高効率化などに応用され成果があがっている。また、同研究の発展として、シリコン切粉からシリコンナノパーティクルを形成し、リチウムイオン電池材料にリサイクルする技術が開発されている。

### 3. その他

システムレイヤを縦断してトータルの消費電力を削減・最適化する研究開発の重要性は、IoT 社会へ向けて重要度が増すばかりである。システムサイエンスに基づく大規模な社会実装と実験を含む、より公益的な研究プロジェクトへの発展が強く望まれる。