

CREST 研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」 追跡評価報告書

総合所見

本研究領域は、戦略目標「高信頼・高安全を保証する大規模集積システムの基盤技術の構築」の下、宇宙関連、自動運転、5G 通信、ビッグデータ、IoT 等における大規模集積回路 (VLSI) のディペンダビリティに対し、システムの各階層でハードウェアとソフトウェアが協調するアプローチにより、微細化、コンピューティング能力、ストレージ容量等の領域で従来唱えられていた物理的限界を突破するイノベーションの創出と研究領域の継続的発展を融合した技術革新に取り組んだ。

本研究領域の成果は、社会における価値の主体がものづくりから、個々の技術的価値をネットワークで結び市場を拓げるようなサービスを含めた総合的な流れに大きく変遷する中で、安心・安全・快適な社会を実現するシステムの基盤技術を提供し続け、Society 5.0 の実現に向けたシステムの構成要素の技術開発に多大なる貢献を果たした。

研究期間中の本研究領域の研究成果事例としては、ISSCC 等権威ある学会や学術誌で高く評価された研究成果が多数あり、それに係わる多数の特許が出願され、国内外で 100 件を超える特許が登録されている。実用化に向けては、研究成果を発展させた技術が導入された複数の新しい製品やシステムに展開されており、ディペンダブル VLSI システムの基盤技術が学術面だけでなく社会的にも経済的にも高い波及効果をもたらしている。

研究成果の発展状況や活用状況は、各研究代表者の研究助成金獲得状況、各研究課題に対する論文発表数ならびに特許出願・登録数において、高く評価できる。本研究領域開始以降、CREST や A-STEP 等 JST 関連で 9 件、科学研究費助成事業 (科研費) で 11 件、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) で 3 件等、合計 29 件の競争的研究資金を獲得し、研究終了後の継続・発展に総計で 285 件の論文が発表され、国内、国際特許がそれぞれ 21 件、12 件出願されている。また IEEE をはじめとした国際機関から 28 件の受賞や、国際学会での 51 件の招待講演実績がある。

研究成果の科学技術の進歩への貢献では、デジタル回路分野における「Random Telegraph Noise」の影響の重要性を世界で初めて指摘したほか、メモリ分野においては大容量 SSD での超長期データ保存ストレージ装置の 300 倍の長寿命化に成功するなど、国内外から高い評価を受けている。実用化に向けては、災害時 300 万人の所在地通知とショートメッセージ通信による安否確認システムや、Industry4.0 の故障予知などの機能安全への実用化に向けた進展に大きく寄与した。

今後の本格的な大規模社会実装に向けて、社会の新たな価値潮流に対する先端中核技術として、本研究領域で醸成され発展してきた技術が社会への高い波及効果を継続的に付与していくと十分期待できる。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域は、実施後の科学技術の進歩においても、基盤となる重要な技術として認知され、現在の技術革新の礎となっている。また本 CREST で実施した研究成果から宇宙関連、自動運転、5G 通信等、多数の進化・発展した研究成果が継続的に生まれてきている。

本研究領域開始以降で CREST や A-STEP 等 JST 関連で 9 件、科研費で 11 件、NEDO で 3 件等、合計 29 件の競争的研究資金を獲得していることは高く評価される。研究終了後の継続・発展に総計で 285 件の論文が発表され 21 件の国内、12 件の国際特許がそれぞれ出願されている。また IEEE をはじめとした国際機関から 28 件の受賞や、国際学会での 51 件の招待講演の実績がある。

上記は、Society5.0、低炭素社会に寄与する IoT、AI 技術を含めたコンピューティングや通信の最先端研究開発であることから、本研究成果およびそこから発展研究が現在のエレクトロニクス・情報・通信等幅広い分野の進歩を支えている。以下にその具体例を個々に示す。

梶原誠司（九州工業大学）が推進した「フィールド高信頼化のための回路・システム機構」においては、オンチップモニタからの劣化検知や故障予知と自律制御機構による高信頼化技術を A-STEP に展開させ、自動運転技術等での企業連携で成果を上げている。

小野寺秀俊（京都大学）が推進した「ロバストファブリックを用いたディペンダブル VLSI プラットフォーム」では、次世代フィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）で期待されるビアスイッチ技術からエネルギー効率化技術等、デバイスレベルでのディペンダビリティを支援する研究を CREST「ナノエレクトロニクス」の研究課題「ビアスイッチの実現によるアルゴリズム・処理機構融合型コンピューティングの創出」で展開するとともに、多数の研究成果を国際学会で発表している。

竹内健（中央大学）が推進した「ディペンダブルワイヤレスソリッドステートドライブ（SSD）」では、高集積ストレージデバイスとシステム技術をリンクした超長期データ保存ストレージを目指した研究が継続的に実施され、次の CREST「ナノエレクトロニクス」の研究課題「デジタルデータの長期保管を実現する高信頼メモリシステム」において、100 年以上のデータ保持を目指すディープラーニングを活用したアーカイブメモリ開発や A-STEP でのベンチャー企業との協業として推進されている。

坪内和夫（東北大学）の研究を発展させた末松憲治と亀田卓の両名（東北大学）は、「ディペンダブルワイヤレスシステム・デバイスの開発」において、研究成果を内閣府主導で立ち上げた「Q-ANPI」安否確認システムにスペクトラム拡散 CDMA（符号分割多重アクセス）技術と同期技術を提案し、社会貢献事業の設計・開発に参画した。これにより災害時の 300 万人の所在地通知とショートメッセージ通信が可能となった。

藤野毅（立命館大学）が推進した「耐タンパディペンダブル VLSI システムの開発・評価」では、本研究領域の研究成果の特許をベースに、A-STEP で企業連携による実用化を目指している。また NEDO での PUF（物理複製不可能デバイス）による IoT ハードウェアセキュリティ

ティの実用化研究に展開している。

このように多くの研究代表者が、本研究領域の研究成果を継続・発展させたディペンダブル技術による今後の安心・安全・快適な社会の実現に向けて大きく貢献している。

2. 研究成果から生み出された科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果

(1) 研究成果の科学的・技術的観点からの貢献

本研究領域からは、多くの研究成果が国際学会等で発表され、高い評価を得て科学技術の進歩に大きく貢献している。

デバイスからシステムに至るマルチレイヤでの様々な創造的提案や設計・実証、新規技術トレンドの創出等について、ディペンダビリティの向上を中心に以下に記載する。

・デバイス・回路設計分野においては、CREST でのデバイスの「製造バラツキ」「特性劣化」に対して、梶原によるオンチップでのデバイス特性の変化や劣化のモニタ技術の開発や、坂井修一（東京大学）によって、二相ラッチクロッキングとタイミングフォルト検出を組み合わせることで動作周波数向上と電圧削減の両立等のデバイスと回路を協調させた研究が推進されている。更に一般的なデジタル回路においても小野寺は、今後「Random Telegraph Noise」の影響を考慮する必要があることを世界で初めて指摘して、本分野での世界的かつ先導的な役割も果たしている。

・システム応用としては、オンチップでのデバイス特性の変化や劣化のモニタ技術を利用した自律制御機構により、自動運転、IoT 環境モニタシステム、Industry4.0 の故障予知等への適用を目指した研究が梶原により企業と連携で進められている。小柳光正（東北大学）により開発されているチップ層間を高密度の Cu ナノピラーを有するナノ材料膜を介して積層する 3 次元積層型集積回路作製技術は、高信頼マルチプロセッサへの採用が期待されている。また画像プロセッサでは、吉本雅彦（神戸大学）が大手自動車メーカーと共同で開発、技術移転を行っている。山崎信行（慶應義塾大学）が推進している組込みディペンダブルリアルタイム技術は、宇宙の厳しい環境下で従来比 1/10 以下の低リソース（小型/軽量/低消費電力）で分散リアルタイム処理システムの実現を目指している。

・セキュリティ分野においては、IoT ハードウェアセキュリティ基盤研究を中心に、藤野により複製不可能デバイス PUF 技術の研究開発が推進され、新規 PUF として、イメージセンサの画素バラツキ情報を活用した COMS イメージセンサ PUF (CIS-PUF) が開発されている。またエッジ AI のサイドチャネル攻撃対策や、米田友洋（国立情報学研究所）によるハードウェアトロイの検出や解析の研究に展開されている。

・メモリ分野においては、SSD の大容量化の進展での信頼性確保の課題に対して、竹内は超長期データ保存ストレージ装置の実現に向けた誤り訂正符号技術や、ディープラーニングを用いた画像認識によるデータの価値を判断することで 300 倍の長寿命化に成功し、アーカイブメモリとして、国会図書館や医療関連データの長期保存を目指している。また、電力、温度制約の厳しい車載システム向けの HDTV 解像度の物体認識については、ディペンダブル

メモリ技術を核に低消費電力で実現している。

今後、さらに発展を続ける AI 技術、次世代量子コンピューティング、5G Beyond 通信への貢献が期待される。

(2) 研究成果の社会的・経済的観点からの貢献

本研究領域の研究成果は、セキュリティや情報管理等のディペンダビリティ指向の中で、研究成果の社会実証や実用化、新たな応用に向けての活発な取り組みが実施されている。デバイス・回路からアプリケーションのレイヤまで、個々のレイヤ要素だけでなくレイヤ横断するディペンダブル技術の研究が展開され、宇宙分野、自動車分野、IoT、クラウドからエッジコンピューティングなど、Society5.0 や Industry4.0 の実現のために不可欠な技術の推進に大きく寄与し、多様な分野への社会的貢献が行われていると高く評価できる。

以下に、特筆される具体的研究成果を示す。

- ・ハードウェア的・ソフトウェア的両方の攻撃から VM（バーチャルマシーン）を保護するプロセッサとして、「SharkCage」が開発された。この坂井による研究成果は、社会基盤システムとしてのクラウドや車載システムのセキュリティの向上へ貢献している。

- ・社会実証としては、スペクトラム拡散 CDMA 技術と同期技術を展開し、内閣府主導で立ち上げた「Q-ANPI」安否確認システムで、システムの構成、設計に参画した末松と亀田らの事例が挙げられる。これにより、災害時 300 万人の所在地通知とショートメッセージ通信が可能となり、レジリエントな防災・減災機能を強化した社会に貢献している。

- ・SSD の大容量化の進展による信頼性の課題に対し、竹内の継続的な研究展開が産業界に大きなインパクトを与えている。並びに高信頼化の技術を発展させて、超長期データ保存ストレージ装置の開発をベンチャー企業と共同で実施するとともに、本研究領域の研究成果を社会的貢献として国会図書館や医療関連のデータの長期保管に貢献した。ストレージメモリの研究をシステム階層まで持ち上げ、ディペンダブルメモリに相応しい公的アーカイブやクラウドへの応用という新しいアプリのステージを開拓している。

- ・自動車応用においては、自動運転やインターネットを介して外部と繋がるコネクテッドカーサービスに対するセキュリティ強化が必須であり、耐タンパディペンダブル技術として車載 ECU（エンジンコントロールユニット）等へのサイドチャネル攻撃で企業との実用化に向けての開発が藤野によって進められている。

- ・フィールドでのオンチップモニタによる特性劣化検出技術は、梶原により Industry4.0 の故障予知などの機能安全への実用化に向けての進展が進められている。

このように本研究領域の研究成果から生まれたディペンダブル技術は、物理的要因からアプリケーション要因を俯瞰したデバイスからシステムレイヤー間の協調・補完により、信頼性だけでなく利便性、コスト耐久性等を向上させる多くの新たな研究成果を創出しており、社会的、経済的に高く評価できる。今後も、人を中心とした安全・安心で高付加価値な社会システムを実現する Society5.0 や Industry4.0 の発展を強力に推進する役割を継続し

ていくと認められる。

(3) その他の特記すべき波及効果

多くの研究代表者は、ディペンダブル VLSI の研究を深耕後、大学や学部マネジメントや後任の育成の立場からの指導を行っており、ディペンダブル VLSI の研究者の裾野を大きく広げている。例えば安浦寛人は、九州大学の理事・副学長として大学運営・マネジメントに専念する中で、IoT 環境を導入した次世代型キャンパスを立ち上げている。また、研究代表者以外に多数の研究者が参画して様々な体験を通じて、その分野から脱皮し多様な分野をも見通せる人材が育成された。主たる共同研究者であった黒田忠広が、東京大学大学院のシステムデザイン研究センターのセンター長として活動の幅を広げているのもその一例である。

このように、DVLSI の本研究以降の展開としてのアプリケーション指向の流れの中で、異分野の研究者との交流を介して、様々な視点から多様な産業に貢献する研究スタイルを構築している。これらは、今後のグローバル社会に生きる若手研究者にとっての有用な道筋を示したものとして、評価できる。また、彼らの研究活動スタイルは、世界のオピニオンリーダーとなるべき新分野の確立や、ベンチャー企業との連携推進、標準化活動等様々な分野において将来技術への重要な布石を敷いている。

3. その他

本研究領域は、半導体技術が様々なシステムに展開され、価値の源泉がデバイス指向からシステムアプリケーションにシフトしていく時期に実施されたものであり、この方向性を俊敏にとらえた研究者や関係者により、その後の継続的な発展・展開を遂げてきている。

多様な技術価値のネットワークや、それらによる更に新しい価値創造が今後要望されてくることを踏まえ、本研究領域で推進されてきたディペンダブルな半導体回路システムの社会実装や実用化の推進が、より重要性を増すであろう。