

戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)

研究領域
「ディペンダブル VLSI システムの
基盤技術」

研究領域事後評価用資料

研究総括: 浅井 彰二郎

2015 年 3 月

目 次

(注：本資料は、領域事後評価のために作成されました。以下の目次中、2. 項は独立法人科学技術振興機構による記載、他は研究総括、浅井彰二郎によるものです。)

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	1
(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.....	5
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.....	7
7. 研究を実施した結果と所見.....	10
8. 総合所見	14

1. 研究領域の概要

(1) 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」

CREST など「戦略的創造研究推進事業」は、国の科学技術政策や社会・経済ニーズを踏まえて文部科学省が定める「戦略目標」の下に、独立行政法人科学技術振興機構が研究領域及び研究総括を設定し、公募等によって産学官から優れた研究者を結集して、戦略目標の達成に向けた研究の推進を行うものである。平成 19 年度には戦略目標の一つとして、「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」が設定された。当該戦略目標については、文部科学省ホームページに記載がある。

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryo/07021516/007/001.htm

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発センター（CRDS）では、上記の文部科学省戦略目標に対応するCREST研究領域の設定につき、報告書「戦略プログラム：VLSIのディペンダビリティに関する基盤研究－高信頼・高安全を保証するVLSI基盤技術の構築」を平成19年3月に提出している。本報告書は、JST-CRDSのWebsiteにPDFファイルとして残されている。

<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2006/SP/CRDS-FY2006-SP-13.pdf>

その中で、研究の意義・目的や内容に触れた数節を引用する。

「VLSI（大規模集積回路）のディペンダビリティとは、VLSIが組み込まれたシステムや製品をユーザがいつでも安心して利用できることを保証する性質である。」

「VLSIのディペンダビリティ実現に向けての課題は、VLSIの微細化限界追及に伴うデバイス単体の課題や、設計時のミス、運用時の人為的攻撃からの防御など、広範にわたる。」

上記のように、CREST研究領域、「ディペンダブルVLSIシステムの基盤技術の研究」は、文部科学省の戦略目標、それを受けて立案された科学技術振興機構の構想に基づいて平成19年度に発足した。以下、ディペンダブルVLSIをDVLSI、本CREST研究領域をDVLSI研究領域と略記する。

(2) 研究領域

「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」（平成 19 年度発足）

今日、人類の社会的、経済的活動は電子情報通信システムに大きく依存している。電話やコンピュータは小型軽量高機能化されモバイル無線通信により常時インターネットに接続されて、人々の社会・生産活動に不可欠な道具となっている。さらに、自動車、ロボット、プラント、決済用カード、流通、医療、スーパーコンピュータ、データセンタなど現代社会の生産性と利便性を支えるものの何を挙げても、また第一次産業とされた農業や鉱業

の近代化や、近年急速に進んだ人口高齢化への対応においても電子情報通信システムが活用されない分野はない。したがって、電子情報通信システムの信頼性・安全性の確保はきわめて重要な社会的課題である。

いっぽう、VLSI (Very Large Scale Integration=大規模集積回路) はそれらシステムのコア部品として用いられ、システムの性能向上や価格低減における牽引車の役割を果たしてきた。また VLSI はそれ自身が膨大な数の回路素子を含む巨大システムであり、その信頼性・安全性は情報システムの信頼性・安全性のコアであるとも言える。そこで本研究領域は、VLSI を中心に、VLSI をコアとする電子システムの信頼性・安全性を保障するために、横たわる多くの課題を解決することを目的とする。

具体的には次のような研究課題が含まれる。VLSI では、まず素子寸法の微細化のため、電気信号の量が極小化され、放射線や電磁波による一過性雑音事象に対する耐性が低下している。また素子構造の物理的な揺らぎ、経時劣化などの不安定要因が拡大し、素子レベル、回路レベルの欠陥、動作エラーを招く。さらに、規模の拡大と複雑化にともなう設計上のミスを排除すること、検査・検証の完全性を高める方法も重要な研究課題になる。また、VLSI に含まれる情報を改ざんしたり盗んだりする攻撃に対する耐性の強化も重要な課題になっている。

VLSI は物理・素子、回路、論理、チップアーキテクチャの階層からなり、VLSI のさらに外側に OS(オペレーティング・システム)、システム、アプリケーションと階層が重なっている。素子に生じた欠陥(fault)が、回路の誤動作(error)となり、システムの故障(failure)に伝搬するのであり、これら諸課題は階層を通じた視点により始めて正しく把握できる。また課題解決の道も、物理層の冗長性を生かして論理層で訂正するなど階層を越えた対応が必要な場合も多く、ディペンダビリティはハードウェア、ソフトウェアを包含する学際的(inter-disciplinary)な研究課題である。こうした課題に対し、CRESTのようなインター・ユニバーシティ的で、企業の参画を得たプログラムにより取り組むことはまことに適切である。

DVLSI 研究の範囲(scope)は、VLSI 内にとどめるべきではない、VLSI システムの実装(配線、給電、放熱)、分散システム間の接続、無線通信の接続性など、VLSI の上にある階層にある多くのシステムの課題を、VLSI のアーキテクチャ、機能に関する新しい概念によって革新的に解決しようとする試みもきわめて重要である。

(3) 研究総括

浅井 彰二郎 ((株)リガク 顧問)

(4) 採択課題・研究費

表 1 採択課題

採択年度	研究代表者	役職(事後評価時)	研究課題(研究期間)	研究費* (百万円)
平成 19 年度	小野寺 秀俊	京都大学 教授	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 (6.5 年)	538
	坂井 修一	東京大学 教授	アーキテクチャと形式的検証の協 調による超ディペンダブル VLSI (5.5 年)	536
	坪内 和夫	東北大学 名誉教授	ディペンダブルワイヤレスシステ ム・デバイスの開発 (7.5 年)	739
	安浦 寛人	九州大学 教授 理事・副学長	統合的高信頼化設計のためのモデ ル化と検出・訂正・回復技術 (5.5 年)	226
平成 20 年度	梶原 誠司	九州工業大学 教授	フィールド高信頼化のための回 路・システム機構 (5.5 年)	240
	吉本 雅彦	神戸大学 教授	超高信頼性 VLSI システムのため のディペンダブルメモリ技術 (5.5 年)	553
	米田 友洋	国立情報研究所 教 授	ディペンダブルネットワークオン チッププラットフォームの構築 (5.5 年)	377
平成 21 年度	竹内 健	中央大学 教授	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) (5.5 年)	504
	藤野 毅	立命館大学 教授	耐タンパディペンダブル VLSI シ ステムの開発・評価 (5.5 年)	439
	山崎 信行	慶應義塾大学 教授	組込みリアルタイム用ディペンダ ブル SoC 及び SiP に関する基盤技 術の研究 (5.5 年)	464
	小柳 光正	東北大学 教授	自己修復機能を有する 3 次元 VLSI システムの創製 (4.5 年)	382
			総研究費	5018

*) 研究期間中の実績総額 (確定予想を含む)

2. 研究領域および研究総括の選定について

研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」

本研究領域は、情報システムのエンジンである VLSI に関して、極限的な微細化と高集積化が進むにつれ顕在化してきている種々の不安定性要因をはじめとする、VLSI システムの大規模化・複雑化に伴うその信頼性・安全性を脅かす諸課題への対応、またその信頼性・安全性自体の評価技術等、将来の VLSI システムの高信頼・高安全すなわち「ディペンダビリティ」を保証するための基盤技術の研究開発を対象とする。さらに、研究対象の設定においては、本研究領域が解決しようとする目標へ向けてシステムからの観点を重視して、幅広い研究開発課題を対象としているとともに、新規な評価尺度・評価技術の開発も重視されていることから、必要に応じて研究領域内の異なる技術分野間の連携、統合を図ることが可能になっている。以上から、本研究領域は、ディペンダブルな大規模集積システムの基盤技術の構築を目指す戦略目標の達成に向けて適切に設定されている。

以上のように、VLSI システムを構成する各技術階層からの提案を広く対象としており、さらにそれらが相互連携する研究の積極的な推進も可能となっていることから、戦略目標の趣旨に沿う優れた研究提案が多数見込まれる。

(JST 記載)

研究総括 浅井 彰二郎

浅井彰二郎は、半導体デバイス、集積回路製造プロセス、製造検査装置の研究開発に幅広く従事してきており、DRAM や EB 技術の基礎を作りあげた研究開発者の一人として国内外で高い評価を受けている。また、IEEE Third Millennium Medal (1999 年) などの受賞歴も有しており、本研究領域について先見性・洞察力を有していると思われる。

また、株式会社日立製作所において基礎研究所長、常務研究開発本部長、上席常務技術戦略室長などを歴任し、現在は株式会社リガク取締役副社長の職にあるなど、本研究領域に関わる広範な分野の研究開発マネジメント経験を豊富に有しており、大学等での基礎的な研究に留まらず、産業界への展開を見据えて研究・開発を推進すべき本研究領域について、適切なマネジメントを行う経験・能力を有している。さらに、NEDO 電子情報技術審議委員会委員、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会振興調整費審査部会委員、文部科学省政策評価に関する有識者会議委員、スタンフォード大学コンサルティング・プロフェッサー、東北大学金電気通信研究所運営委員会委員長、スタンフォード大学 School of Engineering Advisory Council Member などを歴任している。これらを総合すると、関連分野の研究開発者から信頼され、公平な評価を行い得るとみられる。

(JST 記載)

3. 研究総括のねらい

「総括のねらい」の要点は以下の4点になる。

- 〈1〉 実証的な研究とする：新規なチップ・回路の概念、試作実証結果、設計・検証・検査用ソフトウェアなど有用性が世界的に認知される有形の成果物を世に出し、技術革新の恩恵またはその展望をもたらす。同時に特許権利化を進め、標準化を目指す。理論的裏付け優先性主張のため技術論文も不可欠な研究成果として位置付ける。
- 〈2〉 階層上位を指向した研究とする：素子・物理から、回路・論理、VLSI アーキテクチャ、システムに至る諸階層のより上位に波及する成果を狙う。これにより関連産業の付加価値を増大し、より確実に安全安心イノベーションをユーザ層に届ける。
- 〈3〉 産学連携の実践：産業・社会の日常的問題の中に、解決を要する本質的な課題を特定することを研究の入口とし、問題を掘り下げて思考し、実際に有用優位な解を産業・社会に提供する出口まで届ける事例を実行する。産学連携の定着に貢献する。
- 〈4〉 新たな研究方向の特定：新しい科学や技術の分野を定義、開拓する。

4. 研究課題の選考について

平成19年度のテーマ募集にあたっては以下のような簡単な方針を提示した。

- 1) 研究領域の趣旨に沿った挑戦的な、世界的な水準の研究提案を求める。
- 2) 産業・社会の実践場面における具体的・本質的な問題を捉えその問題を掘り下げた上で、具体的な問題解決策と達成目標を明確に記していることを重視する。
- 3) 目標の妥当性（現在技術からの水準差、有用性、波及効果、達成可能性）を重視する。
- 4) 提案者（チーム）の研究実績や能力伸長への期待値を考慮する。

平成19年度の応募は8件と少なかった。提案には適用対象や受け手を特定した実践的計画が不足していた。夢は大きいが現実からは遠い、研究室的に好まれやすい課題設定が多くあった。初年度応募書類を前にして、これではいけない、という危機感を持った。

こうした認識をもとに、以降3年度にわたる選考を以下のように実施してきた。

- 〈1〉 書類選考会議で出た意見を提案者にフィードバックし、問題定義、目標設定、達成手段の明確化などにつき提案書の書き直しを求めて面接選考に臨んでもらった。
- 〈2〉 面接選考の結果不採択とした提案から「特定調査課題」を選び、7,8カ月かけて提案を磨きなおしてもらいなど、次年度提案の強化を支援した。
- 〈3〉 初年度から領域主催の会議で招待講演やパネル討論による問題啓発を行い、関連学会や学会誌にDVLSI領域の研究の意義を訴えるなど、応募を促進した。
- 〈4〉 VLSIの課題を概ねカバーする多面的なテーマを募ることに注力した。後年度には、耐タンパ性など強調したい分野を募集要項に具体的に例示した。

3年間にわたるテーマ選考が完了し、DVLSIの採択課題は表1のようになった。テーマ構

成を技術分野別にみると図 1 のように、想定適用分野から見たチームの活動は図 2 のようになった。テーマ募集型のプログラムの限界があるが、網羅的とは言えないまでもかなり包括的なディペンダビリティ問題への取り組みが形成できたと考える。

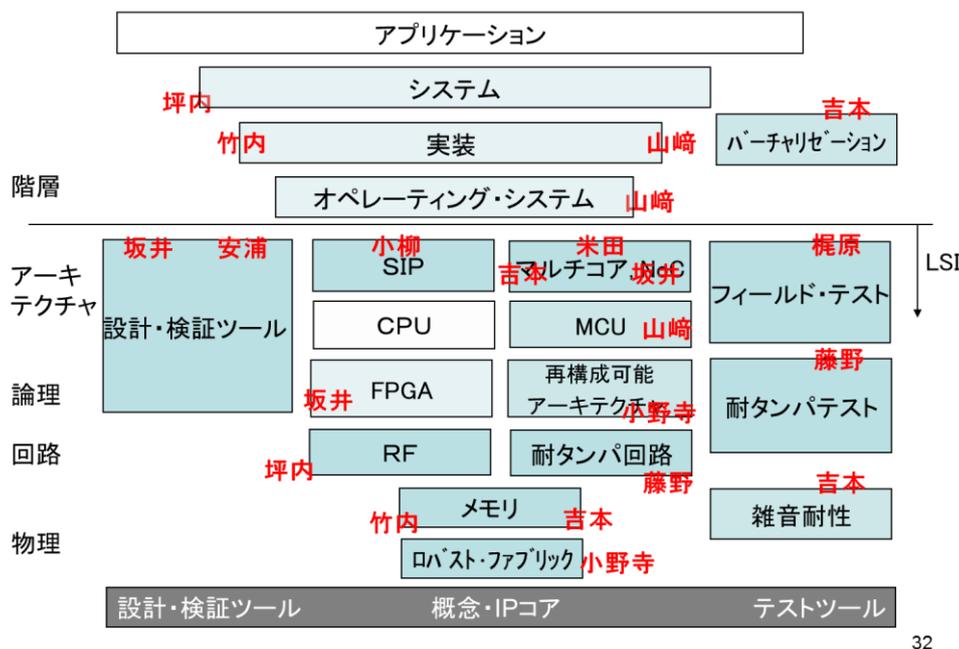


図 1 本研究領域のカバーする範囲（チーム内の活動は、すべて研究代表者名で標記）

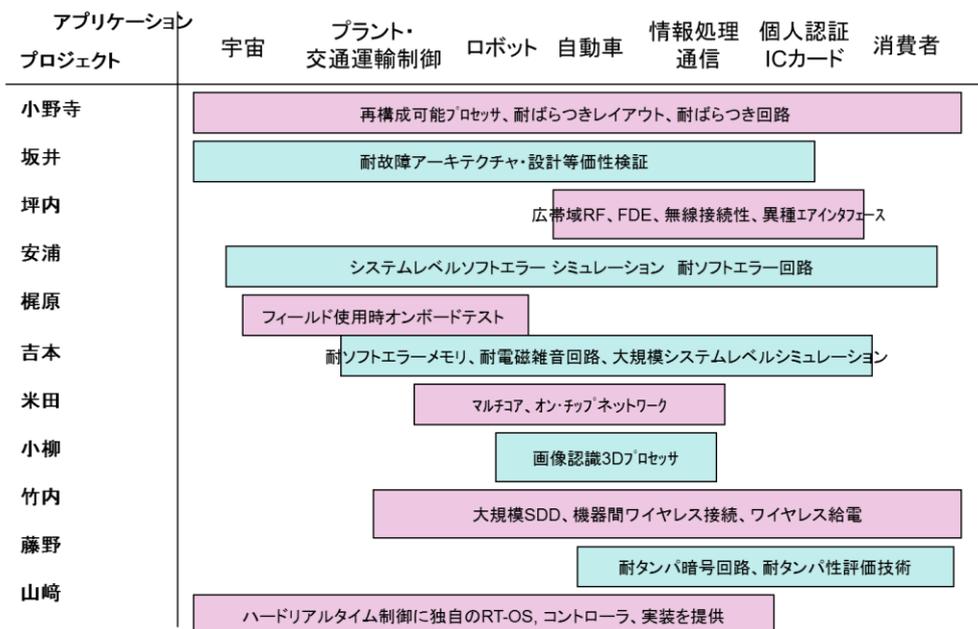


図 2 想定適用分野と、課題解決へのアプローチ

5. 領域アドバイザーについて

アドバイザーの人選に当たっては、企業、公的研究機関、大学から、VLSI の設計や応用につき見識豊かで、率直かつ建設的な意見を述べる方々を、主として総括の知己の中から選んだ。大学や公的研究所からはシステムに近い階層の研究者、企業からは VLSI ないしシステムの開発従事者にお願いした。

アドバイザーの方々は、テーマ選考、領域の諸会議、定期的評価などの重要な場面で、明快でユニークな方向を提示する、議論の結果多数意見を形成するなどにより総括に協力し、本領域の研究進捗に貢献された。本領域の研究が進んで来たのは、領域アドバイザーのご尽力によるところが大きい。

表 2 領域アドバイザー

領域アドバイザー名	所属	役職	任期
石川 正俊	東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻	教授	H19. 6. 1 -現在
菊野 亨	大阪大学大学院情報科学研究科	教授	同上
高橋 忠幸	独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所	教授	同上
西 直樹	日本電気株式会社システムIPコア研究所	研究所長	同上
矢野 和男	株式会社日立製作所中央研究所	主管研究長	同上
長谷川 淳	ルネサスエレクトロニクス株式会社	副本部長	H21. 4. 1 -現在
増渕 美生	株式会社東芝セミコンダクター&ストレージ社半導体研究開発センター	副センター長	H21. 4. 1 -現在
高山 浩一郎	富士通株式会社次世代テクニカルコンピューティング開発本部	シニアディレクタ	H24. 4. 1 -現在
野口 孝樹	株式会社ルネサステクノロジシステムソリューション第四事業部	副事業部長	H19. 6. 1- H21. 3. 31

(所属、役職は就任当時)

6. 研究領域の運営について

(領域運営において留意した事項)

本領域は、領域アドバイザー、JST 担当者に総括を加えた領域マネジメントによって運営してきた。この間留意してきた事項を整理すると、以下の 4 項目になる。

- <1> 入口戦略と出口戦略を重視する。
- <2> PDCA サイクルを実践する。
- <3> 変化と進展に柔軟に対応し、目標の見直しやリソース配分を行う。
- <4> 研究者の事務的負荷を軽減する。

以下各項について少し詳しく述べる。

項目<1>：入口戦略としては研究者が産業・社会のニーズを聞く機会を増やし、出口戦略として領域からの研究成果の受取り手の確保を図った。図3のように DVLSI を取り巻く産業階層とそのバリューチェーンを考慮し、階層を越えた交流、インタレストグループ的な活動を推進した。企業技術者の討論参加、研究チーム参加、産学共同研究の促進などである。具体的に研究活動に参加いただいた企業を図4に挙げた。

項目<2>：領域マネジメントの評価、判断、助言を研究チームに迅速率直にフィードバックし、課題、目標、方法の妥当性チェックを加速した。中間評価、年次進捗報告会の報告書、評価票のフォームに領域独自の変更を加え、評価の視点を明確にするとともに、PDCA やベンチマーキングの実践を盛り込む工夫をした。

項目<3>：研究の進展、ニーズや社会環境の変化に対応し、出口戦略拡充に向けた計画の追加変更に対応する、「発展テーマ」の仕組みを考案し実施した。

項目<4>：年次報告書は年度進捗報告書ベースの小修正とし、中間評価を行ったチームの当該年度の進捗報告を省略した。

(領域中間評価の評価結果について)

領域中間評価においてはたくさんの有用なコメントをいただいた。

- <1> 研究成果をシステムにいかに関り込むかの出口戦略の充実、
- <2> テーマ範囲の拡大し過ぎに対する注意、
- <3> マネジメント・運営方針の具体化、
- <4> 社会適用を重視する運営の中で純粋な科学としての研究成果への着目、
- <5> 世界標準につながる成果の確保とその展開活動、
- <6> チップだけにとどまらないモジュールレベル技術の考慮、
- <7> 成果の社会への波及の観点での評価の重要性、などである。

これらの指摘事項は中間評価以降の重要な指針として領域運営に反映した。

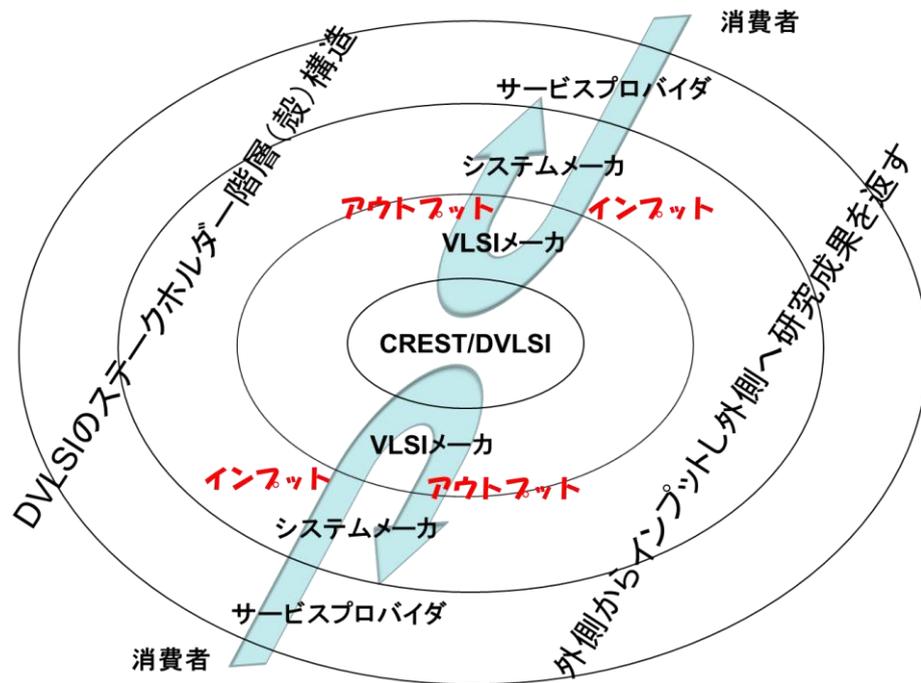


図3 DVLSI をとりまく諸産業階層との交流

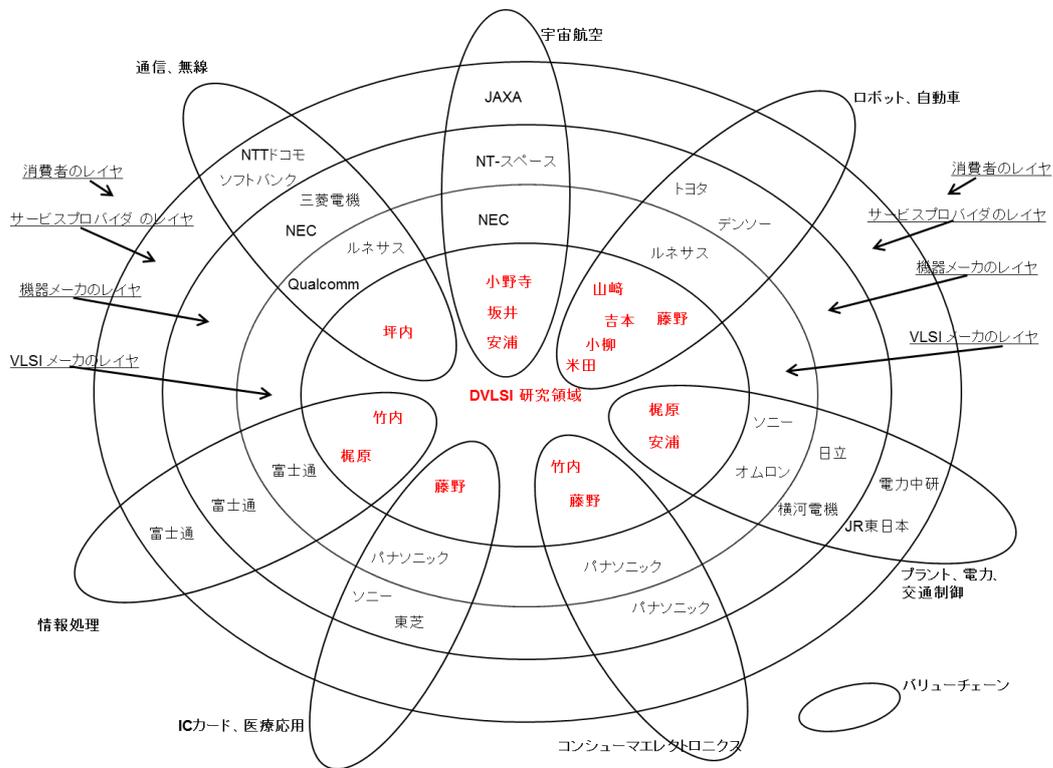


図4 DVLSI 研究関連のバリューチェーンと何らかの形で参加いただいた企業

7. 研究を実施した結果と所見

(1) 各チームの研究の経過と所見

事後評価時点での概要を表3にまとめた。

表3 各チームの研究の経過と所見

研究チーム 代表者	課題・目標・方法	研究経過と結果	所見
小野寺 秀俊	素子微細化に伴う特性のばらつき、経年劣化、ソフトウェアなどによるデッドタイム・ビリティ低下の克服を目的とし、素子、回路からアーキテクチャまでの課題に階層横断的に取り組んだ。	途中から企業グループを追加してアーキテクチャ面を強化、C言語記述で制御系とデータ処理系を設計できる再構成プロセッサを提案した。耐ばらつき/放射線レイアウト、回路など要素技術を提案・効果確認し企業の採用を募っている。	左記アーキテクチャを研究組合LEAPの成果と組み合わせ、柔軟再構成汎用LSIを提案した。学会等での認知は今後にも次世代の主流プロセッサとなる可能性がある。桜井東大教授のCREST PJに引き継ぎ。
坂井 修一	VLSIシステムのデッドタイム・ビリティを飛躍的に向上させるアーキテクチャ・検証技術を開発し、検証技術を開発し、シミュレーションと試作機の製作・評価を通してその有効性を検証する。	アーキテクチャ面では、耐ばらつきクロッキング技術、ルータ利用メモリア、検証技術では大規模等価性検証技術、ポストシリコン自動修復技術を提案した。途中実証加速のため企業グループを加えた。	企業との協力による課題設定や効果実証が十分に機能してこなかった。メーカーやEDAベンダとの接触は継続している。今後にも期待をつなぐ。
坪内 和夫	重要社会基盤である公衆無線に安定接続を確保する技術を提供する。Si CMOS技術で700MHz～60GHzをカバー、送受信回路、ADC、等化器など、要素技術の開発を行う。	異種インフラと高精度位置情報により接続品質を向上する方式を提案した。災害時には準天頂衛星と超長符号化を用いた提案を行い、社会実装に向け諸機関との協力強化を図っている。要素技術開発も順調に進展した。	提案方式は5G以降の通信システムに快適、安全・安心のインベーションをもたらす可能性がある。権利化、認知活動の強化、大規模実証実験に向けての理解増進、体制づくりが重要である。

安浦 寛人	VLSI のディペンダビリティを設計段階で評価し強化できるツールを開発する。対象をソフトウェア、タイミングエラー、悪意攻撃の3脅威に絞り、素子、回路、論理、RTL 各階層向けのツールを目指す。	ソフトウェアが素子、回路、論理、機能と階層を伝播する際の抽象化に有効なモデルを導入した。メモリ構成トレードオフ、経年劣化耐性キャリア Flip-Flop、NBTI 起因劣化故障の予測技術などに進歩があった。	当分野はアメリカのEDA ツールベンダーが席卷し、日本の大学の研究への注目/協力が得難い環境にある。しかし諦めず、企業と力を合わせた課題設定や事例実証を実行してほしい。
-------	--	---	--

研究チーム 代表者	課題・目標・方法	研究進捗状況	注目事項・懸案事項
梶原 誠司	稼働中の VLSI の一部または全体を一時的にテストモードにし、短時間で高品質な自己テスト・診断を行うことで、劣化の検知と故障検出を可能とし、システム故障を未然防止する概念を提案した。	使用環境変動に強い遅延時間精密測定、スキャンや論理 BIST など有望なフィードバックテスト技術を多数提案。多くの企業と精力的に接触し要求事項の把握や効果の共同実証に努めた。製品適用に近い事例多数。	交通システム制御用 ASIC、同 FPGA など連携企業の用途への適用が具体化している。有力特許網を構築している。機能安全標準化に向け白書を作成し、企業と連携し活動している。
吉本 雅彦	SRAM のディペンダビリティ阻害要因に対処する個別技術の開発と、総合効果をシステム LSI レベルで検証する課題設定。車載システムへの利用を想定している。	2重化メモリセル構造、電源電圧制御、耐雑音技術、ID 自己生成 (PUF) などに優れた発案がある。アプリケーション機能を含むシミュレーションの提案も有力である。	個々の要素技術、マルチコアプロセッサ統合技術、Virtualization が、LSI メーカー、システムメーカー、EDA ベンダにおいて製品としての活用が期待できる。
米田 友洋	マルチコアとオンチップネットワークをディペンダビリティに活用する発想。自動車制御への応用を掲げ、チップ間通信も視野に、故障検出、故障対応技術を開発する。	ハイブリッド車の制御を Hardware-In-the-Loop で実証。耐故障マルチコア、非同期 NoC、チップ間通信などの検討を進めた。自動車、車載メーカーとの接触も深めている。	自動車関連メーカーの注意を喚起する実証フェーズに到達している。今後ともユーザ企業との連携を密にして進めることを期待している。

研究チーム 代表者	課題・目標・方法	研究進捗状況	注目事項・懸案事項
小柳 光正	車載画像処理プロセッサを対象とし高性能、高データ信頼性の目標を設定した。自己診断、自己修復、多重化を含むアーキテクチャという大きな構想。	物理階層から応用まで広範な課題に取り組んだ。3D-LSIを試作したが、残念ながら全体構想の実証には至らなかった。重要な要素技術提案が含まれている可能性がある。	本チームは日本における3D-VLSI研究のアカデミックな中心である。今後の技術固めと波及に期待する。
竹内 健	大容量SSDを無線化しデータ信頼性を向上する。個別課題では3グループがそれぞれ①不揮発メモリの信頼性大幅増大、②ワイヤレス接続、③ワイヤレス給電に挑む。	エラー訂正効率を向上し、フラッシュメモリのエラー耐性を大幅拡大(1000倍程度)した。非接触コネクタで無線通信速度12Gb/s、無線給電で従来比2桁高速な制御など大きな進歩を見た。	技術実証、論文発表(ISSCC14件)、特許出願、技術移転などに全グループが活躍した。不揮発メモリ、無線実装は経済的成長分野として期待され、それを牽引する成果が得られた。
藤野 毅	金銭情報や個人情報扱うシステムの耐タンパ性保障のため、悪意ある攻撃を防ぐLSI技術に取り組む。耐タンパ暗号回路、LSI耐タンパ性評価法、チップ固有ID生成法を成果目標としている。	耐タンパ暗号回路方式と設計プラットフォーム、耐タンパ性評価・解析技術、内在ばらつきをチップIDとして使用するPUF技術を開発、耐タンパ強度や実用性を実証、メーカーからも注目されている。	評価Platform SASEBOは既に世界デファクト標準。回路技術に期間中顕著な進歩がみられ、サイバー安全の分野で日本が世界に伍して行くためのVLSI技術面の素地を築いた。
山崎 信行	一定時間内の応答が必須要求であるロボット制御を適用対象とし、リアルタイムOS、コントローラSoC、I/O通信制御、実装にわたる広範な技術に総合的、実践的な手法で取り組む。	粒度10 μ sのハードリアルタイム制御(従来比1000倍)を可能にした。要素技術をSIP実装した評価キット、Web上のユーザー向けドキュメント提供、各種のデモ機会を活用など、普及活動にも努めた。	総合的な取り組みを東大ロボットへの実装で効果実証するところまであと一歩である。協力者・ユーザーの輪を広げる努力中でありさらなる進展を大いに期待できる。

(2) 出口戦略の状況

研究成果を活用する企業、機関に移管する出口戦略の状況を表4に示す。

表4 研究成果の移管状況

項番	研究代表者	成果概要	出口状況	
			出口企業・機関	ステージ
1	小野寺	耐放射線FF、遅延モニタ	募集中	研究(PoC)段階
3		再構成プロセッサ	CREST別プログラム(H26年度採択)、独法、メーカ	研究(PoC)段階
4		ポストSi検証ツール	英EDAベンダー	研究(PoC)段階
5	坂井	メニコアプロセッサ向けNoC試験ボード	開発ツールメーカ	製品化ずみ
6		位置情報を活用最適ネットワーク選択	通信事業者各社	技術を提示、前途相談中
7	坪内	準天頂衛星を用いた簡易双方向通信	関係官庁、通信事業者、メーカ	技術を提示、前途相談中
8		衛星/地上異種ネットワーク用システム LSI	関係官庁、通信事業者、メーカ、半導体メーカ	開発段階
9		700MHz ~ 60GHz 異種対応送受信LSI	半導体関係企業	開発段階
10	梶原	FPGA向け遅延測定と事前劣化検知	システムメーカ	研究(PoC)段階
11		BIST用高品質遅延テスト生成	システムメーカ	開発段階、製品適用段階
12		オンチップ温度・電圧モニタ	システムメーカ	開発段階
13		開発テスト効率化と信頼性予測	半導体メーカ	開発段階~製品適用段階
14	吉本	ディペンダブルDualCoreメモリ	メーカ	研究(PoC)段階
15		自律型ディペンダブルメモリ	半導体メーカ	開発段階
16		細粒度アシスト回路SRAM	半導体メーカ	製品化準備段階
17		シングルコアVirtualization技術	メーカ	製品化段階
18	米田	マルチチップ・非同期式NoC等	メーカ、半導体メーカ	研究(PoC)段階
19	小柳	3次元VLSIシステムの高信頼化技術	メーカ	研究(PoC)段階
20		高信頼3Dシステムモジュール	メーカ	研究(PoC)段階
21	竹内	誤り訂正技術適用ストレージ、ITサービス	メーカ	研究(PoC)段階
22		誤り訂正技術適用SSD	メーカ	開発段階
23		誤り訂正技術	メーカ	製品化段階
24	黒田 (竹内)	TLC(伝送線路結合)コネクタ	複数メーカ、独法	研究(PoC)段階
26			メーカ	開発段階~製品適用段階
27	藤野	PUF技術	相談に回答中	製品適用段階
28		耐タンパAES暗号回路	京都高度技術研究所、立命館大学、名城大学	研究開発段階
29		PUF認証	メーカ	製品適用段階
30		サイドチャネル標準評価環境	メーカ、エンジニアリング会社	
31	山崎	FFCSP(3次元実装)の実用化	メーカ	PoC~製品化段階

表4の案件はいずれも企業等と共同で検討する段階に入っているが、なお概念・効果実証段階にあるものから、開発段階、製品化段階のもの、製品適用済のものまでがある。

(3) ディペンダビリティ研究の海外への波及

DVLSIは、米欧に以下のような類似研究PJが開始されるきっかけとなった。

(米) FAILURE-RESISTANT SYSTEMS、スポンサー：NSF及びSRC、2013年開始、2015年1月現在23プロジェクト

http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=504754

<http://www.nsf.gov/awardsearch/advancedSearchResult?ProgEleCode=8081&BooleanElement=ANY&BooleanRef=ANY&ActiveAwards=true&#results>

(独) DFG SPP1500 Dependable Embedded Systems、スポンサー：DFG、2011 年開始、現在継続中。

<http://spp1500.itec.kit.edu/index.php>

上記プロジェクトとは、招待講演の交換等を通じ交流をはかった。

8. 総合所見

(1) 研究領域としての成果の見通し

本研究からは、VLSI を使用するシステム全体にイノベーションを起こしうる研究成果がいくつか生まれている。

その中から、特に優れた数例について以下説明する。選択の判断基準は、①VLSI/システム実証状況、②論文発表・特許権利化状況、③企業等出口の受容状況、④期待される社会経済効果においている。

①大規模システムクラスメモリー（竹内チーム）

要約：固体メモリスシステム（SSD）の回路～システムの各階層に不揮発性メモリの動作原理と信号処理技術にもとづく誤り訂正法を導入し、エラー耐性を 1000 倍以上向上させた。

発表、権利化：ISSCC で 2010～5 年連続発表、特許出願 14 件（国内、海外合計）。

出口連携：8 社以上。

製品化計画：ベンチャー企業シグリードの SSD は 2015 年に発売予定。

イノベーション効果：データセンタや長期保存アーカイブに適用される大規模固体メモリスシステムの技術基盤となり、日本がなお先頭グループに立つ本産業分野の優位維持伸長に貢献できる。

②再構成プロセッサ・アーキテクチャの概念（小野寺チーム）

要約：C 言語記述により制御系、データ処理系の両方を定義して、論理回路アレイを用途に応じて再構成できる汎用 ASSP アーキテクチャを提案した。LEAP（超低電圧回路技術共同研究組合）の成果である「原子スイッチ」と組み合わせている。

連携企業：JAXA、他

イノベーション効果：汎用 ASSP として、MCU や FPGA に次ぐ標準的 VLSI となりうるプロセッサ・アーキテクチャであるとの認識を連携企業、総括/アドバイザー、最終報告会出席者が共有している（牧本次生氏は氏の期待する“Highly Flexible Super Integration”に相当と 1/31 コメント）。特許も研究チームならびに研究参加企業により申請されている。しかし真の効果実証は今後の研究開発に俟つところが大きく、学会等での発表も十分ではない。幸い、CREST「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（桜井貴康研究総括）」に採択された。その枠組みの中で、技術内容、アプリケーション等をさらに発展充実させて行けるとの期待を持っている。

③機器/サブシステム間無線接続（黒田忠弘（竹内チーム））

要約：伝送線路結合器を用いたワイヤレス高信頼非接触コネクタで電子機器の実装を無線化し、電氣的・機械的信頼性を向上させる。特許 28 件（国内 8 件、海外 20 件）で特許網を構築。ISSCC 発表 7 件。

イノベーション効果：スマホモジュール、車載、宇宙、表示デバイスなど多くのアプリケーションへの適用を連携企業とともに推進中であり、機器の小型・高性能化、多機能化、耐振性などにおける革新技術となる可能性がある。総括として ACCEL に推薦中。

④耐タンパ性強化回路、耐タンパ性評価技術（藤野チーム）

要約：耐タンパセキュリティ回路、自己 ID 生成 PUF 技術、ならびに耐タンパ強度評価プラットフォームを開発した。PUF は既に研究参加企業の製品に適用済みである。

イノベーション効果：車載情報システム、プラントや社会インフラ制御等に用いるセキュア VLSI 技術、個人認証カード用 VLSI 技術の確保は急務である。本チームの成果はそのニーズに応えるものであり、大きな社会・経済効果が期待できる。

⑤異種無線インタフェースによる公衆無線通信の接続性確保（坪内チーム）

要約：平常時、非常時を問わず、WiFi 系、携帯電話系を含む異種エア・インタフェースから最適の接続を確保するとの重要な提案を行い、広帯域 CMOS RF、信号処理、アンテナ、人工衛星利用（精密位置情報、超長符号化）等の要素技術により担保している。

イノベーション効果：広域災害のような緊急時の衛星利用、4K 時代を迎えるスマートフォンにおける異種接続や接続選択への端末の関与という本研究の提案の重要性は、政府関係、プロバイダ、通信 LSI メーカーの見解となっている。市民生活の安心安全、利便性の確保向上に不可欠の概念提案であり、今後の社会実装の推進により、大きな経済効果も期待される。

⑥フィールドにおけるオン・チップ VLSI テスト技術（梶原チーム）

要約：VLSI の劣化をフィールド使用中にテストし、システム故障を未然に防止する技術を提案、多くの連携企業と適用に向けた検討を進めている。

イノベーション効果：本提案のフィールドテストは、高信頼システム（社会インフラ、自動車等）向け VLSI（ASIC/SoC, FPGA, プロセッサ）に適用することで、安心安全社会実現と電子製品の国際競争力向上に貢献する。

(2) 本領域を設定したことの意義

今日電子・情報技術を用いるどんなシステムにも、そのコアとして VLSI が用いられ、信頼性のコアとなっているが、その VLSI は一方では微細化、一方では複雑化にともなうディペンダビリティの脅威因子を内包している。それら因子がシステム故障に伝播して社会、企業、個人に甚大な被害をもたらさないために、絶えざる技術開発が必要である。こうした多階層、複雑系の研究に一組織、一研究チーム、アカデミアのみで取り組むことは困難である。本領域設立の意義は、この多様な課題に対し、複数のチームが連携をとりながら、産学にまたがるマネジメントチームのガイダンスのもとに取り組む組織的な活動を開始したところにある。

結果から見て、本研究を実施した効果は、次の数項目に整理できる。

- 〈1〉 VLSI システムのディペンダビリティ課題をとりあげ、VLSI の微細化（ばらつき・対雑音脆弱化・経時劣化）、複雑化（設計過誤）、人為的攻撃、要求充足不足（ハードリアルタイム要求、接続性）など、ディペンダビリティの脅威を軽減する設計ならびにテスト法についての研究の結果、多くの新概念を提案しその有効性を一部確認した。
- 〈2〉 安全・安心の価値を、製品・サービスとしてユーザに届けるためのディペンダビリティ技術の基盤構築に貢献した。
- 〈3〉 システム価値指向で階層縦断的な研究を大学に企画実行してもらい、システム開発で活躍できる人材（大学院学生、研究者）を育成した。
- 〈4〉 基礎的、長期的な研究開発課題を共有して産学が連携すると、よい結果が得られるとの事例の一つとなった。

(3) 今後の展望

①成果の実証と出口戦略の遂行

関係者の努力の結果、DVLSI の成果実証と出口戦略は進んでいる。多くのテーマで、研究チーム（所属機関）と受け手企業との間で NDA に始まり、共同開発、製品開発/技術移転に至る協力や契約関係が結ばれている。かなりの案件が、企業が必要性を認めているがゆえにその段階に入っていると思われ、そうしたものは市場の論理に委ねて行けると考える。

一方では、本 CREST の次の段階として以下のようなさらなる仕組みを活用/整備し、本研究ではぐくまれた技術提案を、さらにもう一段大きく育てて行くことが望まれる。

- 〈1〉 研究をさらにもう一段先に進める

JST の研究助成制度 CREST, ERATO, ACCEL など適用し、本 CREST の研究をさらに科学的にも深めかつ応用の可能性を推進する。小野寺チームの「再構成プロセッサ」や、竹内チーム黒田教授の「無線実装」の発展提案がこれにあたりと考えている。

- 〈2〉 「安心・安全」についての国家的目標を実現するため、システムレベルの社会実装を実現する。坪内チームの「地上系・準天頂衛星利用を含め平常時の広帯域接続確保と非

常時の接続を確保した無線通信システム」、藤野チームの「耐タンパセキュア ID カード技術」がこれにあたりと考えている。

②国際標準化

ディペンダブル VLSI 研究では研究成果を世界に役立つ国際標準とすることを眼目の一つとしてきた。デ・ジュール標準採用に向けて提案発信するには、実証を進めると同時に、背景となる優れた学術論文や特許網を持つこと、研究成果とその持つ社会的意義を訴える、「ホワイト・ペーパー」が大切であると考えている。機能安全基準 SIL4 採用に向け提案考慮中の梶原チームでは、ホワイト・ペーパー、「フィールド高信頼化のための回路・システム機構」を準備しており、DVLSI のウェブサイトにも掲載している。この活動は、協力関係にある日立製作所の技術陣と協力して進めているところである。一方、デ・ファクト標準は、製品適用された技術を採用した製品が市場を支配することを通じて世界に普及する実力の世界である。まだそのような段階には至っていないが、表 4 に挙げた本研究の出口成果の中にその候補は多数存在する。異種無線接続方式は、デ・ジュール標準(キャリア間の話合いが主導)と、デ・ファクト標準(PC 用などがドライブする)の両面から世界展開が考えられる分野である。

③結言

CREST DVLSI 研究領域では、VLSI のというコア技術の立場から、VLSI ばかりでなく、システム全体のディペンダビリティを増大させることを、VLSI の素子・回路レベルから、VLSI をコア部品として使うシステムまでを見渡して総合的に検討する研究開発を、アカデミアを中心にしつつ、産業界との密接な連携をはかりつつ推進してきた。多数の注目すべき研究成果も生まれ、多くの研究成果に対し、企業や JAXA から強い関心が示され、実適用に向けた様々な取り組みが進行中である。期待されるイノベーション、産業力強化にも貢献しそうなものも少なくない。関係者のさらなるご努力により産業・社会に実りある結果がもたらされることを祈念している。

謝辞

DVLSI 研究領域は、アドバイザーの方々のご適時適切なガイダンスと JST の領域担当者(期間中に寺下大地、増淵忍、辻本和典の三氏が交代で担当)の献身的なご支援により運営されました。皆様の多大のご尽力に心よりお礼を申し上げます。JST 幹部、CRDS 幹部・スタッフ、戦略研究推進部の幹部・スタッフ、知財部門の各位には、本領域の設定に始まり、領域運営に適切柔軟に対応していただいた。あつくお礼を申し上げます。最後になります。が、研究者各位にこの間のご努力への深甚の敬意と謝意を表します。

以上