

グリーン・コンピューティング・システム研究開発 センター施設概要と研究紹介

早稲田大学

理工学術院基幹理工学部情報理工学科 教授
アドバンスト・マルチコア・プロセッサ研究所 所長

IEEE Computer Society理事

笠原博徳

1985年 早稲田大学博士課程了 工学博士
カリフォルニア大学バークレー客員研究員
日本学術振興会第1回特別研究員
1986年 早大理工専任講師, 1988年 助教授
1997年 教授、現在 理工学術院情報理工学科
1989年～1990年 イリノイ大学Center for
Supercomputing R&D客員研究員
2009年 IEEE Computer Society 理事

受賞
1987年 IFAC World Congress Young Author Prize
1997年 情報処理学会坂井記念特別賞
2005年 STARC(半導体理工学研究センタ)共同研究賞
2008年 LSI・オブ・ザ・イヤー 2008 準グランプリ
2008年 Intel Asia Academic Forum Best Research Award
2009年IEEE Computer Society Golden Core Award

査読付論文 185件,招待講演101件,シンポジウム論文
28件, 研究会論文 129件, 全国大会論文 154件, 新聞・
Web記事・TV等メディア掲載 443件

政府・学会委員等歴任数 220件

【経済産業省・NEDO他】45件 【内閣府】8件
【文部科学省・JST・JSPS・JAXA・原子力機構・海洋研】30件
IEEE 21件, 情報処理学会 36件, ACM 14件, 国際会議PC等 57
件, 高校生科学技術チャレンジ審査委員等 他9件

グリーン・コンピューティング・システム研究開発センター 概要

2011年4月13日竣工，2011年5月13日開所（記念シンポジウム）

経済産業省「2009年度産業技術研究開発施設整備費補助金」
先端イノベーション拠点整備事業

＜目標＞

太陽電池で駆動可能で
冷却ファンが不要な

超低消費電力・高性能マルチコア/
メニーコアプロセッサ*のハードウェア、
ソフトウェア、応用技術の研究開発

*1チップ上に多数のプロセッサコアを
集積する次世代マルチコアプロセッサ

＜産学連携＞

日立,富士通,ルネサス,NEC,トヨタ,
デンソー,オリンパス,
三菱電機(重粒子線ガン治療)等

＜波及効果＞

超低消費電力メニーコア

- CO₂排出量削減
- サーバ国際競争力強化
- 我が国の産業利益を支える
情報家電,自動車等の高付加価値化



2011グッドデザイン賞受賞

グリーン・コンピューティング・システム研究開発センターにおける研究開発

①マルチコア/メニーコア, コンパイラ

(笠原博徳、木村啓二、大附辰夫、戸川望:
日立、富士通、ルネサスエレクトロニクス、NEC)
・低消費電力のマルチコア/メニーコアプロセッサ
・メニーコア用並列化コンパイラ
・メニーコア・アーキテクチャ自動設計技術

②クールサーバー (超低消費電力サーバー)

(笠原博徳、木村啓二、山名早人:富士通、日立)
・メニーコアを用いた低消費電力サーバー

③情報家電・自動車

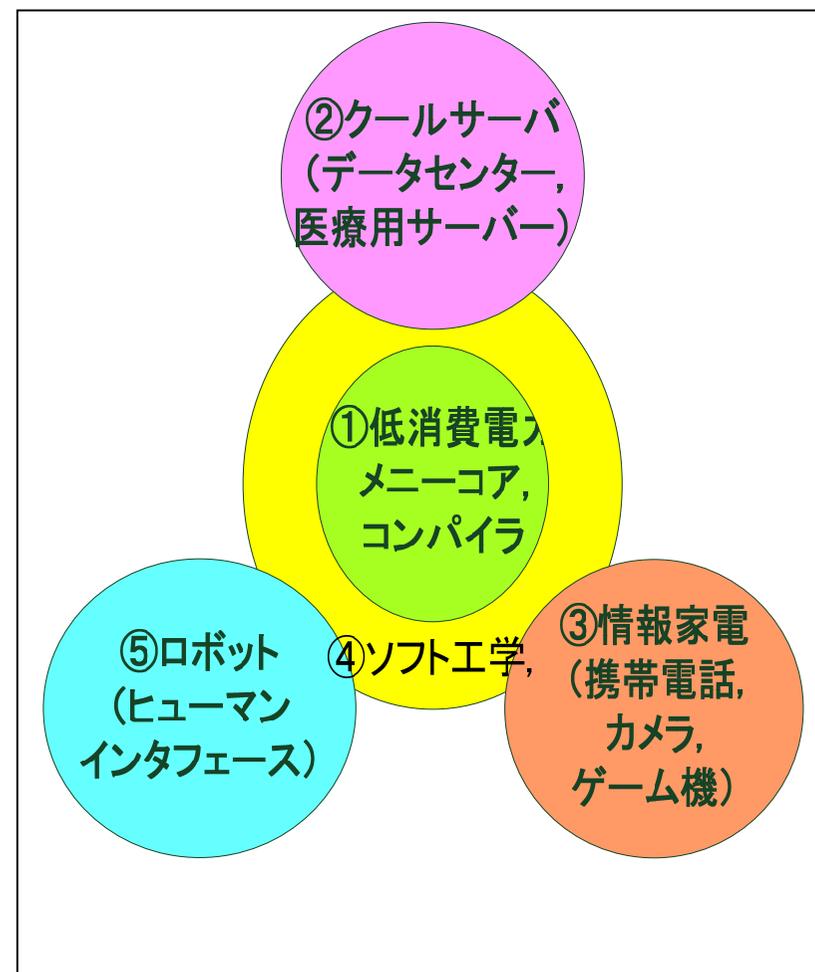
(笠原博徳、木村啓二: ルネサス、NEC、富士通、日立、
オリンパス、トヨタ、デンソー、東芝、ESOL、CATS、ガイオ)
マルチコア・メニーコア用API
(アプリケーション・プログラム・インターフェイス)

④ソフトウェア工学

(深澤良彰、鷲崎弘宜)
・メニーコア用ソフトウェアの高信頼化・低消費電力化

⑤ロボット(小林哲則、白井克彦、藤江正克、菅野重樹)

・メニーコアを用いた高利便性のヒューマン・
インタフェースの開発、ヒューマノイド



各詳細テーマ・参加研究室は研究開発の進展状況等により柔軟に見直す予定。

グリーン・コンピューティング・システム研究開発センターの特徴

• 本施設の役割

世界最先端のソフトウェア協調型低消費電力メニーコア・プロセッサのための、アーキテクチャ、チップ設計等ハードウェア技術、コンパイラ技術を中心としOS、ソフトウェア工学を含めたソフトウェア技術、サーバ・情報家電・ロボット・自動車等への応用技術を研究開発する。

• 規模・装置 (2011グッドデザイン賞受賞)

敷地面積: 3100.54㎡ 延床面積: 5155.11㎡ 階数:

装置: **世界最大級のSMPハイエンドマルチコアサーバ2台(計算機室)**

日立SR16000(Power7) 128Core SMP

富士通 M9000(SparcVII) 256core SMP

大画面ノートPC利用による太陽光電力有効利用・計画停電対応

• 利用形態

1F: 産学連携・知財管理室、プレゼンテーションルーム

2F: 研究サーバー室、ミーティングルーム

3F: (産学連携フロア) 企業を含むメニーコア・クールサーバー研究、客員研究員室
日立、デンソー

4F: (産学連携フロア) 企業を含むメニーコア・情報家電・API研究
トヨタ、NEC、ルネサス、富士通、オリンパス

5F: マルチコア/メニーコアプロセッサ・コンパイラ・API・情報家電研究グループ

6F: プロセッサ・コンパイラ研究グループ
ソフトウェア工学研究グループ、ヒューマノイドロボット

7F: マルチコア/メニーコアプロセッサ・コンパイラ研究グループ
ロボット(ヒューマンインタフェース)研究グループ

• 特徴

- 世界先端拠点として世界の研究者との議論を含めた人材育成を行う機能を付随。
- 研究室間の交流を図りやすくする大フロア確保可能な設計で、ドアはガラス張りに。定期的な交流ミーティング開催。
- 太陽光電力を2階サーバ室に直接給電し、クリーンエネルギー超低消費電力サーバ技術を開発。
- 企業研究室はセキュリティを重視、企業秘密を確保しながら実用化産学連携研究を促進
- 産学連携・知財管理室を設置し産学連携研究開発契約・知財化・ライセンス等を支援。
- 早稲田通りに面し、公共交通機関(地下鉄、バス)の駅から徒歩1分以内のアクセスが便利な場所に設置することで、産学研究者の交流を促進。



平成21年度NEDO「メニーコア・プロセッサ技術 (グリーンITプロジェクト)の先導研究」

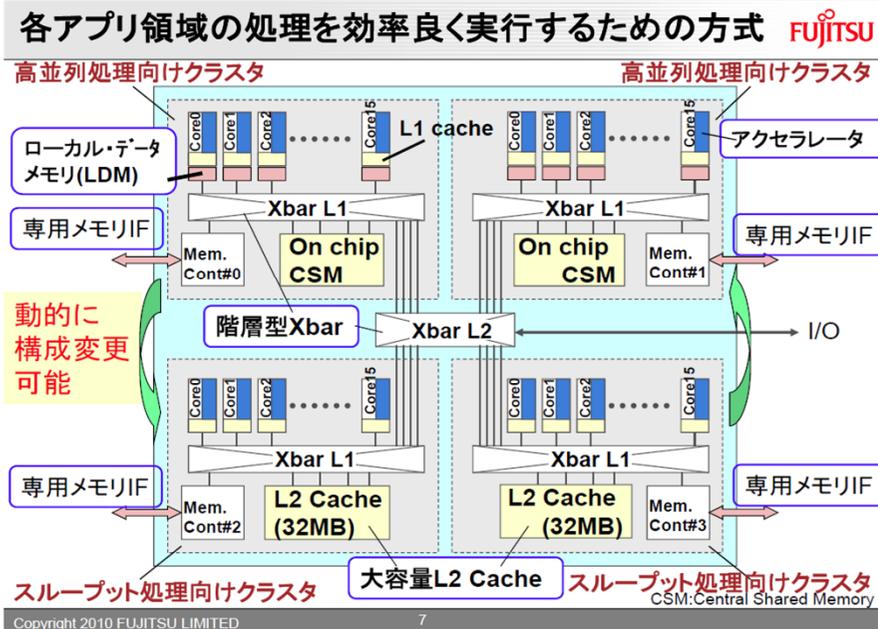
低消費電力メニーコアプロセッサ・システム 技術の先導研究

代表研究者 早稲田大学 笠原博徳

早稲田大学, (株)ルネサステクノロジ, 富士通(株), 日本電気(株), (株)東芝

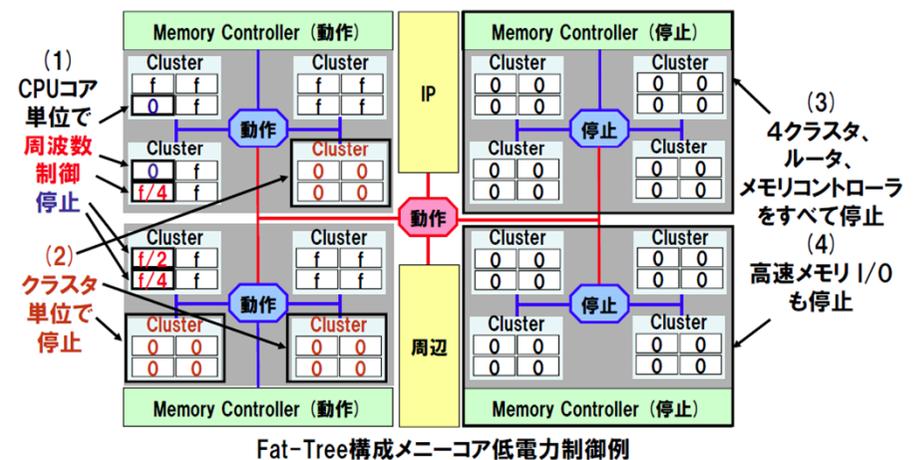
Fujitsu's Vector Manycore Design Evaluated in NEDO Manycore Leading Research, Feb. 2010

Renesas's Low Power Manycore Design Evaluated in NEDO Manycore Leading Research, Feb. 2010



4.3 低電力マルチコア実装技術 (1)

◆ 提案した64コア、Fat-treeアーキテクチャにて、以下のような処理負荷に連動した階層的な低電力制御を行うことで、メニーコアチップ低消費電力実現



産官学連携研究開発・実用化(波及効果)

命を守る

環境を守る

早稲田大学:研究開発

超低消費電力・メニーコアシステム技術

OSCARメニーコアチップ

OSCAR
Many-core
Chip



情報家電
産業競争力を守る

市場規模:情報家電・携帯電話系 数10兆円

市場規模:スパコン・サーバ系 1兆円

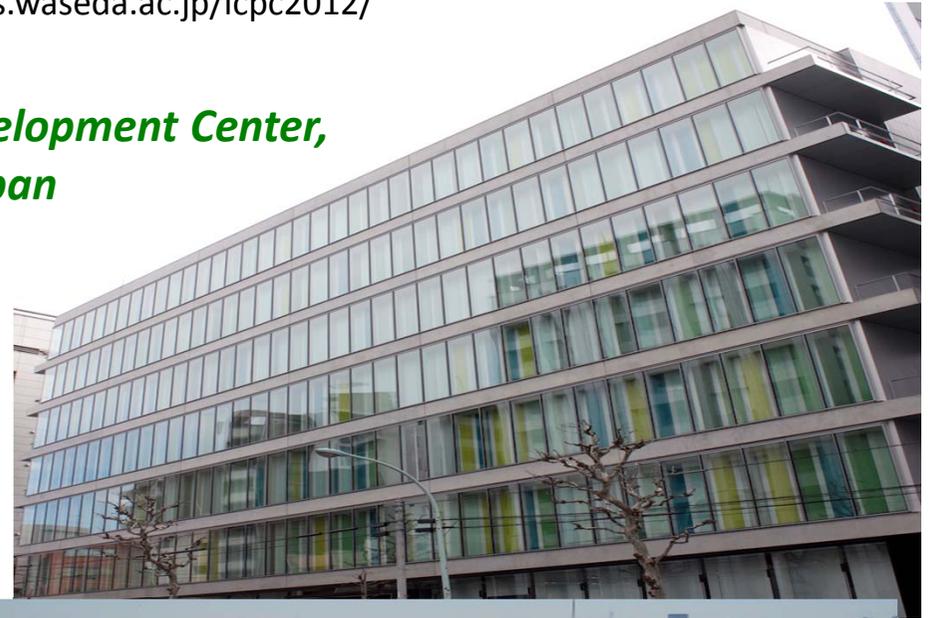
LCPC 2012

The 25th International Workshop on Languages and Compilers for Parallel Computing

(Tentative) <http://www.kasahara.cs.waseda.ac.jp/lcpc2012/>

September 11 – 13, 2012

**Green Computing Systems Research and Development Center,
Waseda University, Tokyo, Japan**



The LCPC workshop is a forum for sharing cutting-edge research on all aspects of parallel languages, compilers and related topics including runtime systems and tools. The scope of the workshop spans foundational results and practical experience, and all classes of parallel processors including concurrent, multithreaded, multicore, accelerated, multiprocessor, and tightly-clustered systems. Given the rise of multicore processors, LCPC is particularly interested in work that seeks to transition parallel programming into the computing mainstream.

General Chair

- Hironori Kasahara, Waseda University

Program Chair

- Keiji Kimura, Waseda University

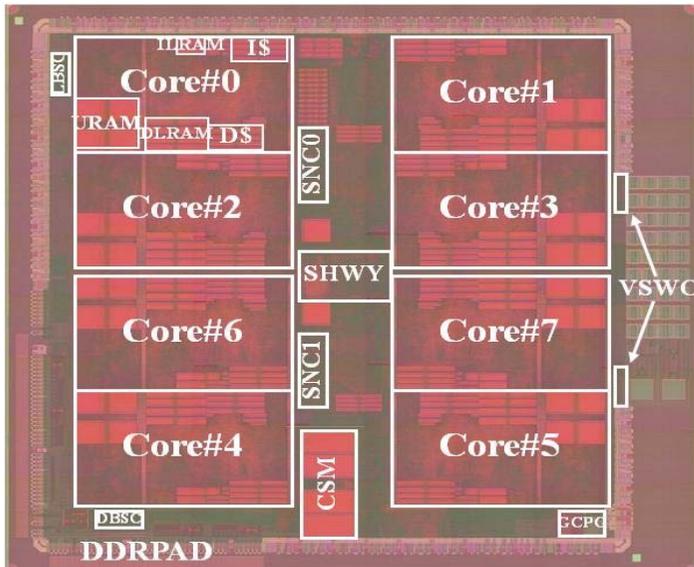
**Post workshop optional tour
on September 14:**

“K” Kobe Supercomputing Center

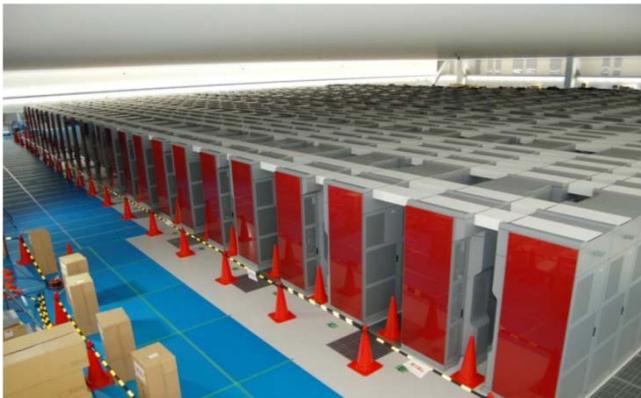


Multi/Many-core Everywhere

Multi-core from embedded to supercomputers



OSCAR Type Multi-core Chip by Renesas in METI/NEDO Multicore for Real-time Consumer Electronics Project (Leader: Prof.Kasahara)



The 27th Top 500 (20.6.2011),
No.1, Fujitsu “K” 548,352 cores
 (Current Peak 8.774 PFLOPS)
 LINPACK 8.162 PFLOPS (93.0%)

- **Consumer Electronics (Embedded)**
Mobile Phone, Game, TV, Car Navigation, Camera,
 IBM/ Sony/ Toshiba Cell, Fujitsu FR1000,
 Panasonic Uniphier, NEC/ARM MPCore/MP211/NaviEngine,
 Renesas 4 core RP1, 8 core RP2, 15core Hetero RP-X,
 Plurality HAL 64(Marvell), Tileria Tile64/ -Gx100(->1000cores),
 DARPA UHPC (2017: 80GFLOPS/W)
- **PCs, Servers**
 Intel Quad Xeon, Core 2 Quad, Montvale, Nehalem(8cores),
 Larrabee(32cores), SCC(48cores), Night Corner(50 core+:22nm),
 AMD Quad Core Opteron (8, 12 cores)
- **WSs, Deskside & Highend Servers**
 IBM(Power4,5,6,7), Sun (SparcT1,T2), Fujitsu SPARC64fx8
- **Supercomputers**
 Earth Simulator:**40TFLOPS**, 2002, 5120 vector proc.
 BG/Q (A2:16cores) Water Cooled20PFLOPS, 3-4MW (2011-12),
 BlueWaters(HPCS) Power7, 10 PFLOP+(2011.07),
 Tianhe-1A (4.7PFLOPS,6coreX5670+ Nvidia Tesla M2050),
 Godson-3B (1GHz40W 8core128GFLOPS) -T (64 core,192GFLOPS:2011)
 RIKEN Fujitsu “K” 10PFLOPS(8core SPARC64VIIIx, 128GFLOPS)

High quality application software, Productivity, Cost performance, Low power consumption are important
 Ex, Mobile phones, Games

Compiler cooperated multi-core processors are promising to realize the above futures

NEDOリアルタイム情報家電用マルチコア技術

＜目的＞ DVD,デジタルTV,カーナビ,携帯電話等リアルタイム情報家電における優位化製品創出を目指したプロセッサ技術の国際競争力強化

＜研究期間＞平成17年7月～平成20年3月

＜内容＞ 下記特徴をもつマルチコア・アーキテクチャ及びコンパイラ技術の確立

- ・優れた価格性能
- ・短ハードウェア・ソフトウェア開発期間
- ・低消費電力
- ・同一アーキテクチャでローエンドからハイエンド製品まで柔軟に対応
- ・集積度向上に対するスケーラブルな性能向上(複数半導体世代に対応)
- ・異なる企業開発のマルチコア間でのアプリケーションの共用

＜API: Application Programming Interface並列化コンパイラと各マルチコアの接続＞

日立,富士通,ルネサス,東芝,松下,NEC

＜委託事業＞ NEDO”アドバンスト並列化コンパイラ“の成果と参加各社のプロセッサ技術を委員会及び研究により発展させ、標準的マルチコア・アーキテクチャと並列化APIを策定し、既存及び新規チップ上での性能評価を通し改良する

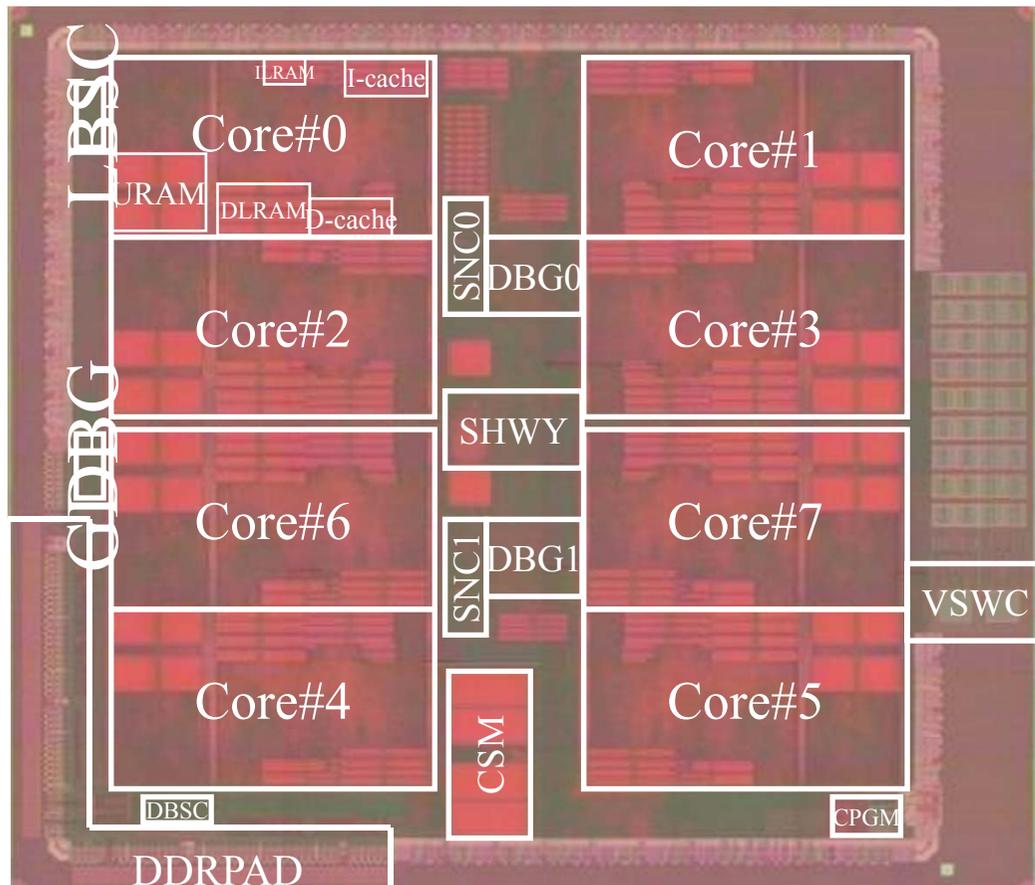
＜助成事業＞ 委託事業にて策定されたアーキテクチャをベースとしたチップ及びその開発環境を開発し委託研究での評価のために供与する

＜PC用プロセッサとの目的の違い＞

リアルタイム処理なアーキテクチャ・自然冷却可能な低消費電力性

早稲田OSCARコンパイラ協調型アーキテクチャ

RP2 8コア搭載マルチコアLSI



プロセス	90nm CMOS, 8層メタル, 3種Vth
チップサイズ	104.8mm ² (10.61mm x 9.88mm)
電源電圧	1.0V-1.4V(コア), 1.8/3.3V(I/O)
動作周波数	600MHz
CPU性能	8640 MIPS (Dhrystone 2.1)
FPU性能	33.6 GFLOPS
低電力制御	<ul style="list-style-type: none"> ・CPU毎に独立した周波数変更 ・CPUコアのクロックを停止するスリープモード ・CPUコアの一部のクロックを停止するがキャッシュコヒーレンシ維持可能なライトスリープモード ・CPUコアの電源供給を停止するフル電源遮断モード ・URAM以外のCPUコアの電源供給を停止するレジューム電源遮断モード

8コア集積マルチコアLSIチップ写真

ISSCC08発表: ISSCC08 論文番号4.5, M.ITO, et al., “An 8640 MIPS SoC with Independent Power-off Control of 8 CPUs and 8 RAMs by an Automatic Parallelizing Compiler”

NEDOリアルタイム情報家電用マルチコアチップ・デモの様子

<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/honkaigi/74index.html>

第74回総合科学技術会議【平成20年4月10日】



第74回総合科学技術会議の様子(1)



第74回総合科学技術会議の様子(2)

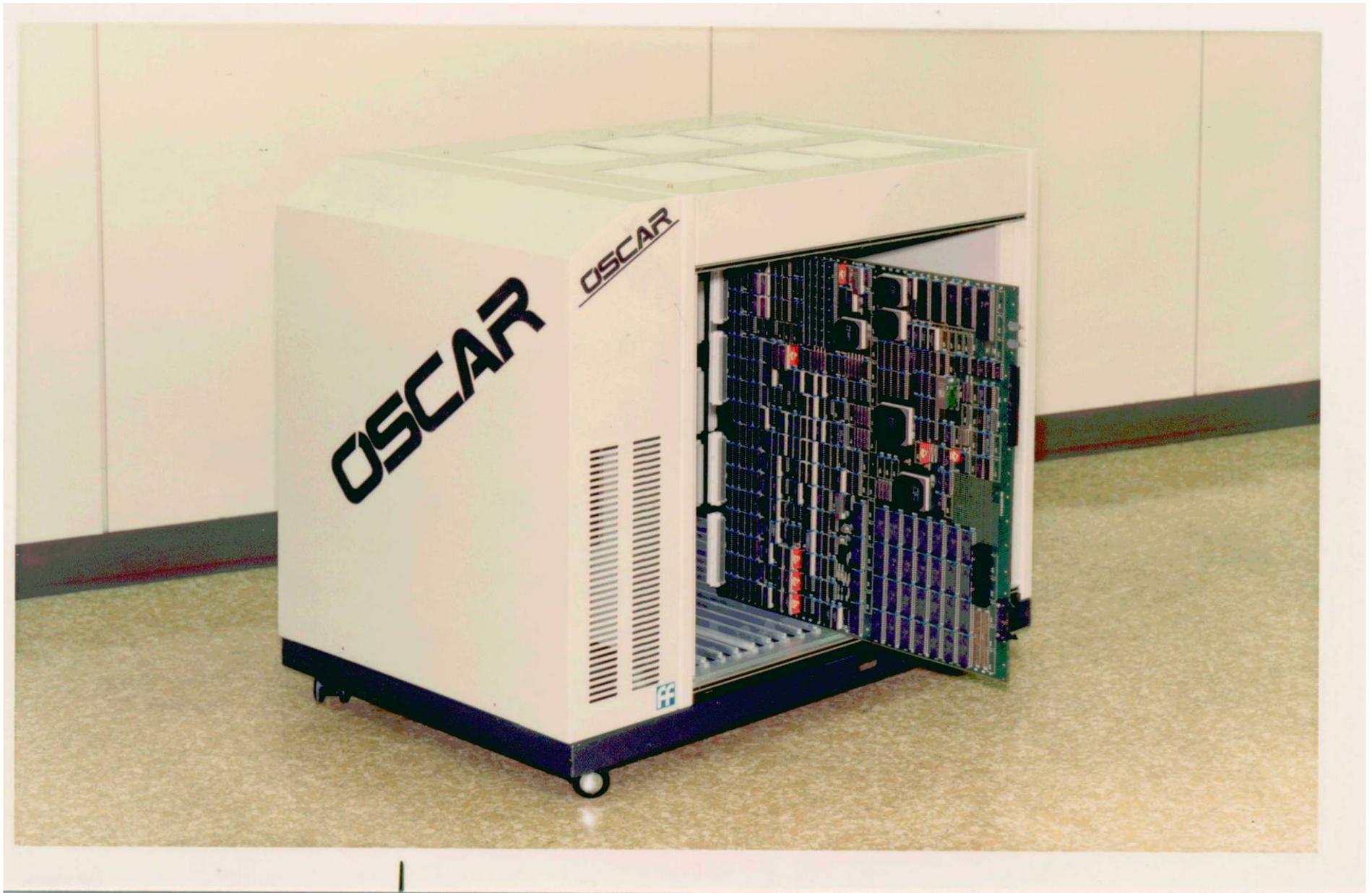


第74回総合科学技術会議の様子(3)



第74回総合科学技術会議の様子(4)

1987 OSCAR(Optimally Scheduled Advanced Multiprocessor)



世界をリードするマルチコア用コンパイラ技術

プロセッサ高速化における3大技術課題の解消

1. 半導体集積度向上(使用可能トランジスタ数増大)に対する速度向上率の鈍化

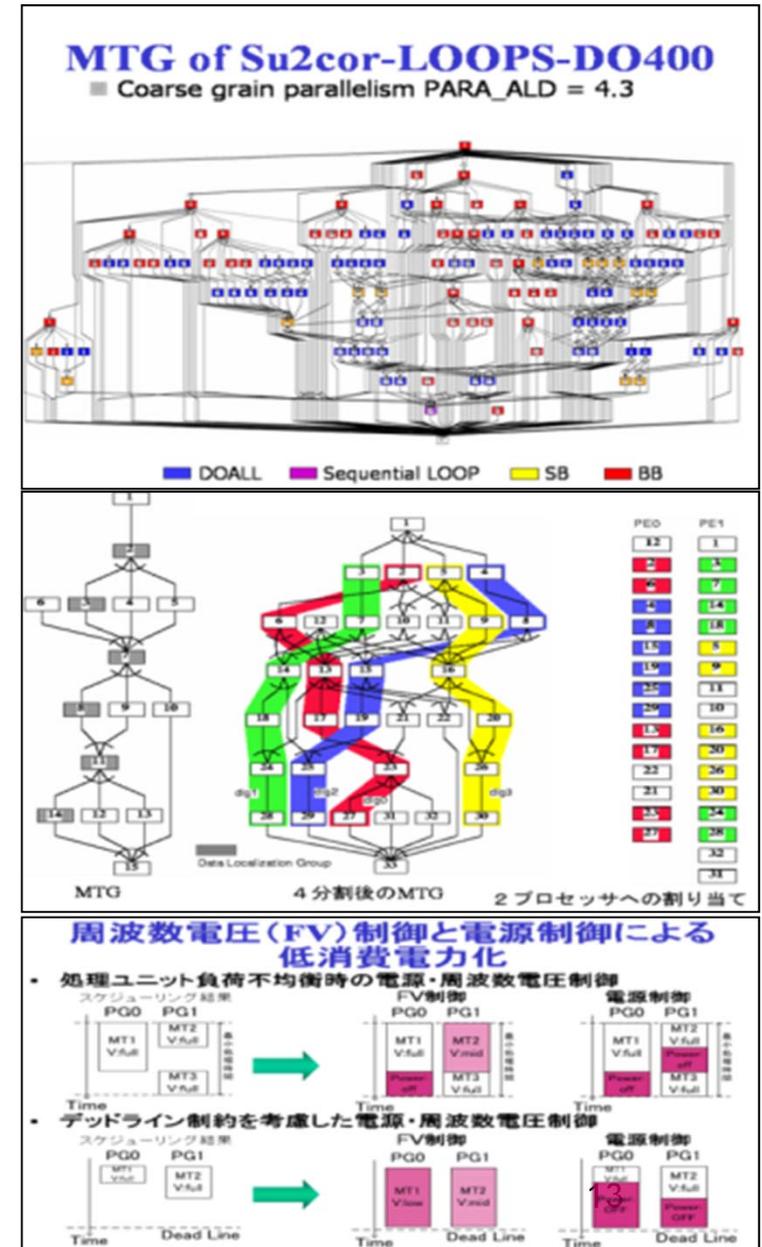
- 粗粒度タスク並列化、ループ並列化、近細粒度並列化によりプログラム全域の並列性を利用するマルチグ레인並列化機能により、従来の命令レベル並列性より大きな並列性を抽出し、複数マルチコアで速度向上

2. メモリウォール問題

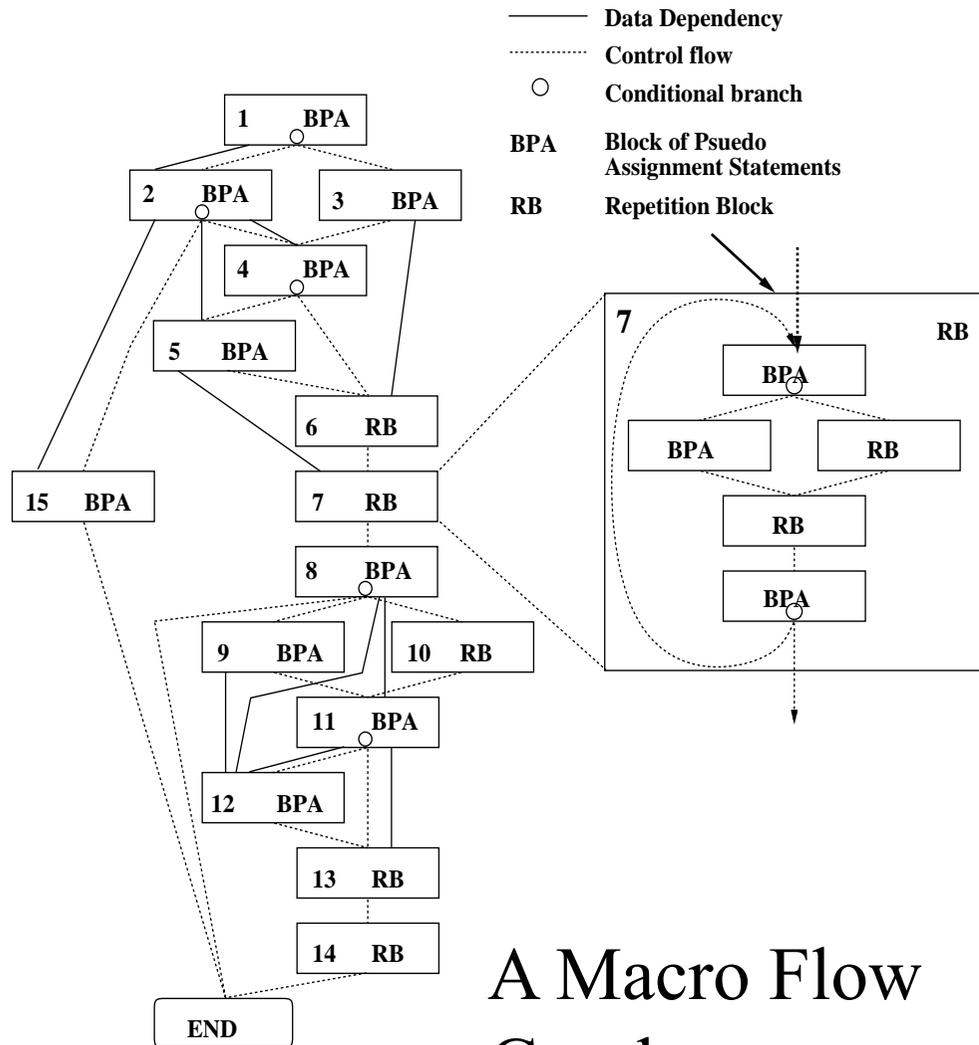
- コンパイラによるローカルメモリへのデータ分割配置、DMAコントローラによるタスク実行とオーバーラップしたデータ転送によりメモリアクセス・データ転送オーバーヘッド最小化

3. 消費電力増大による速度向上の鈍化

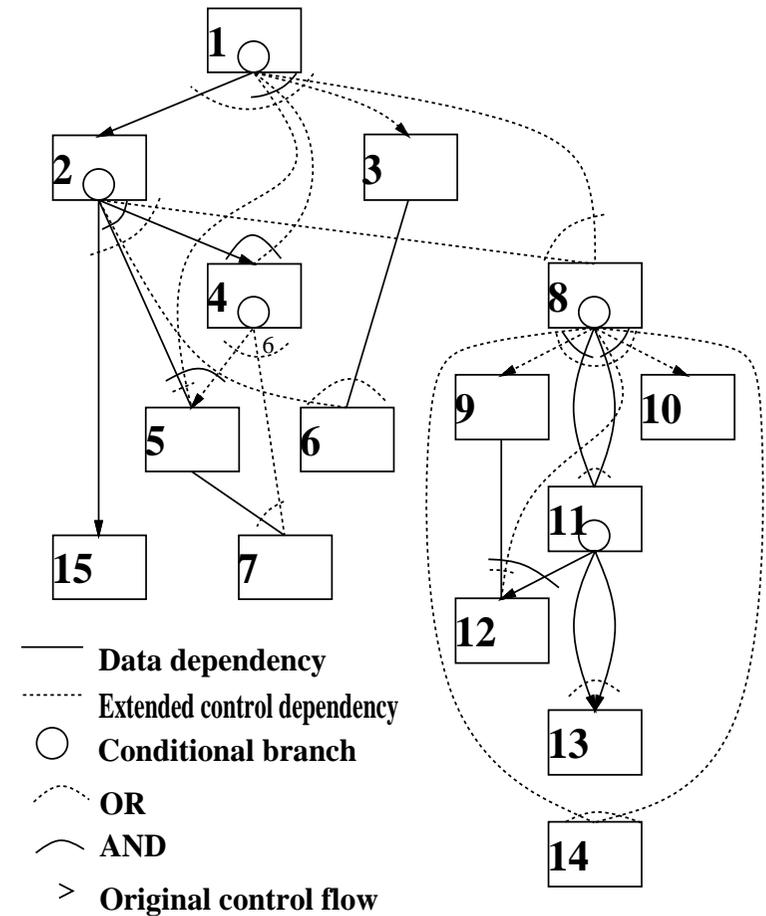
- コンパイラによる低消費電力制御機能を用いたアプリケーション内でのきめ細かい周波数・電圧制御・電源遮断により消費電力低減



Earliest Executable Condition Analysis for coarse grain tasks (Macro-tasks)



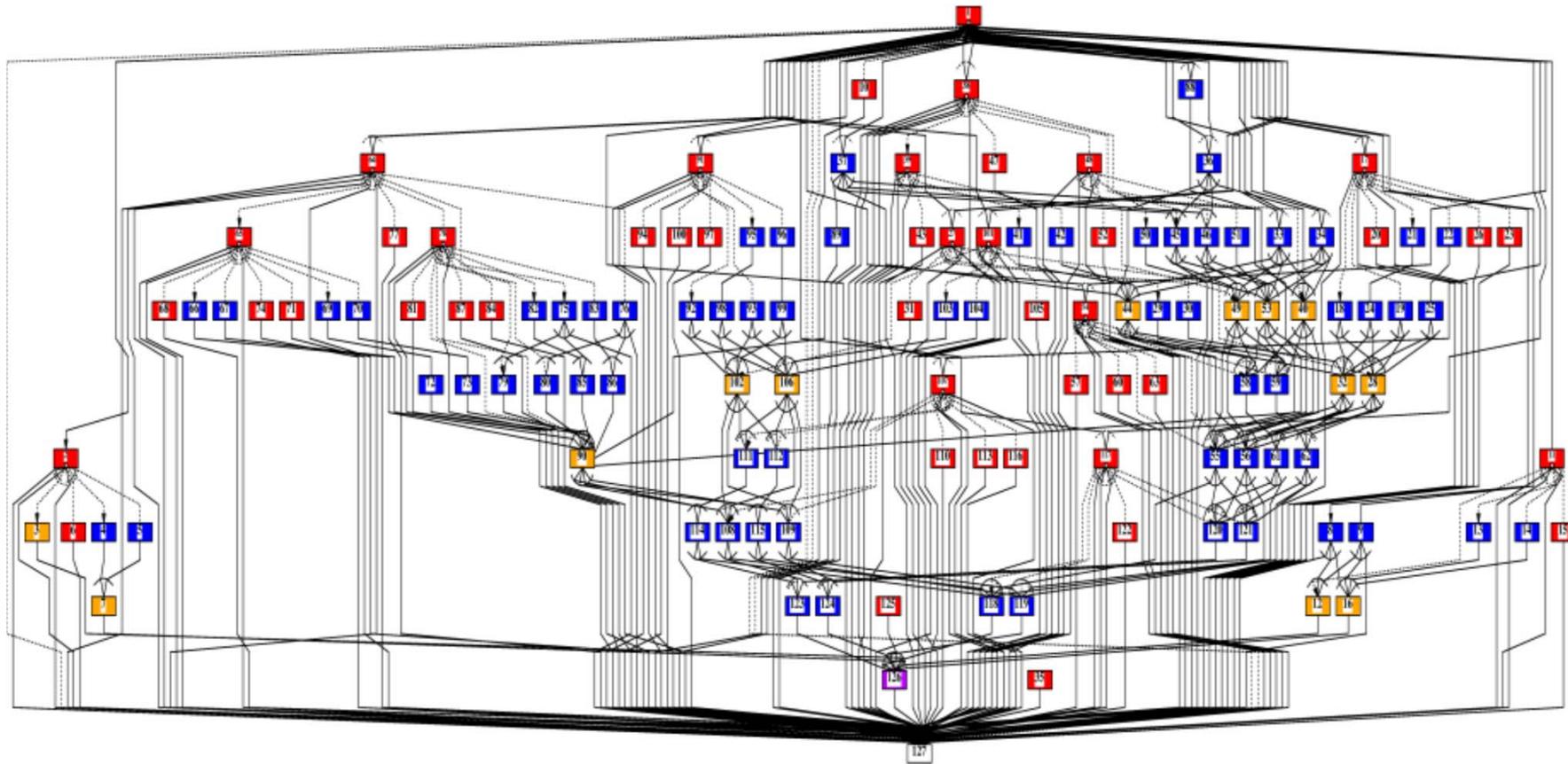
A Macro Flow Graph



A Macro Task Graph

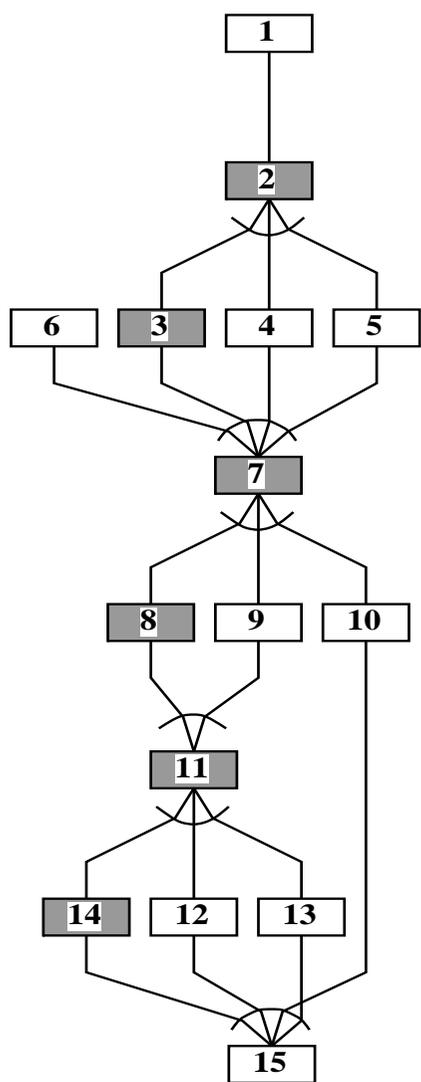
MTG of Su2cor-LOOPS-DO400

- Coarse grain parallelism $\text{PARA_ALD} = 4.3$

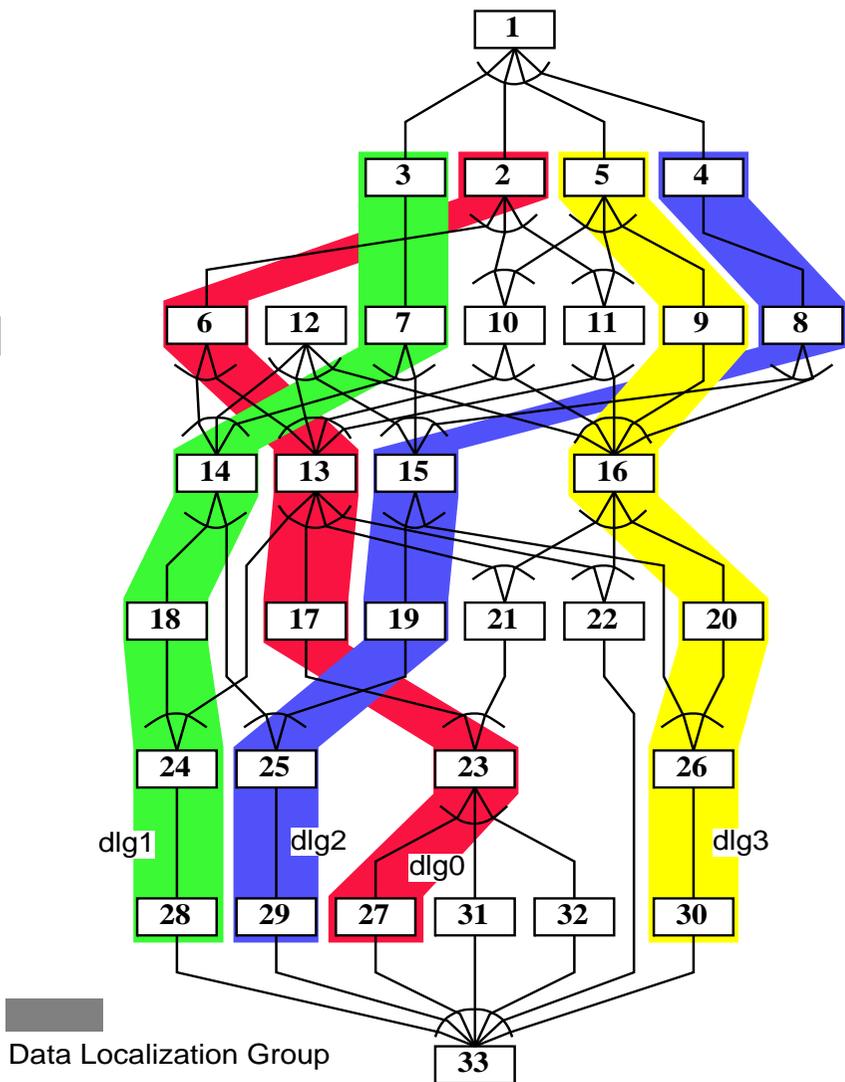


■ DOALL ■ Sequential LOOP ■ SB ■ BB

データローカライゼーションのイメージ



MTG

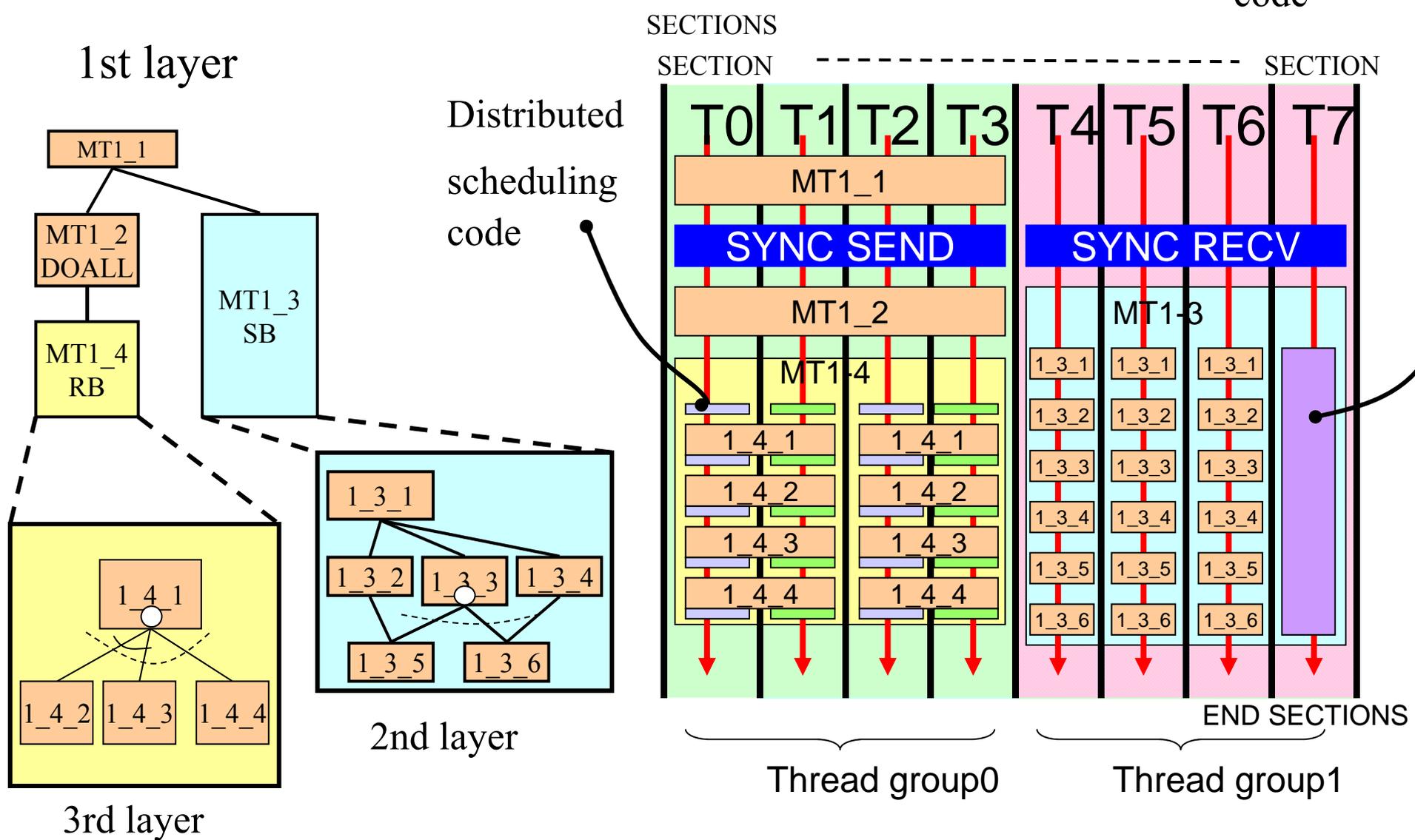


4分割後のMTG

PE0	PE1
12	1
2	3
6	7
4	14
8	18
15	5
19	9
25	11
29	10
13	16
17	20
22	26
21	30
23	24
27	28
	32
	31

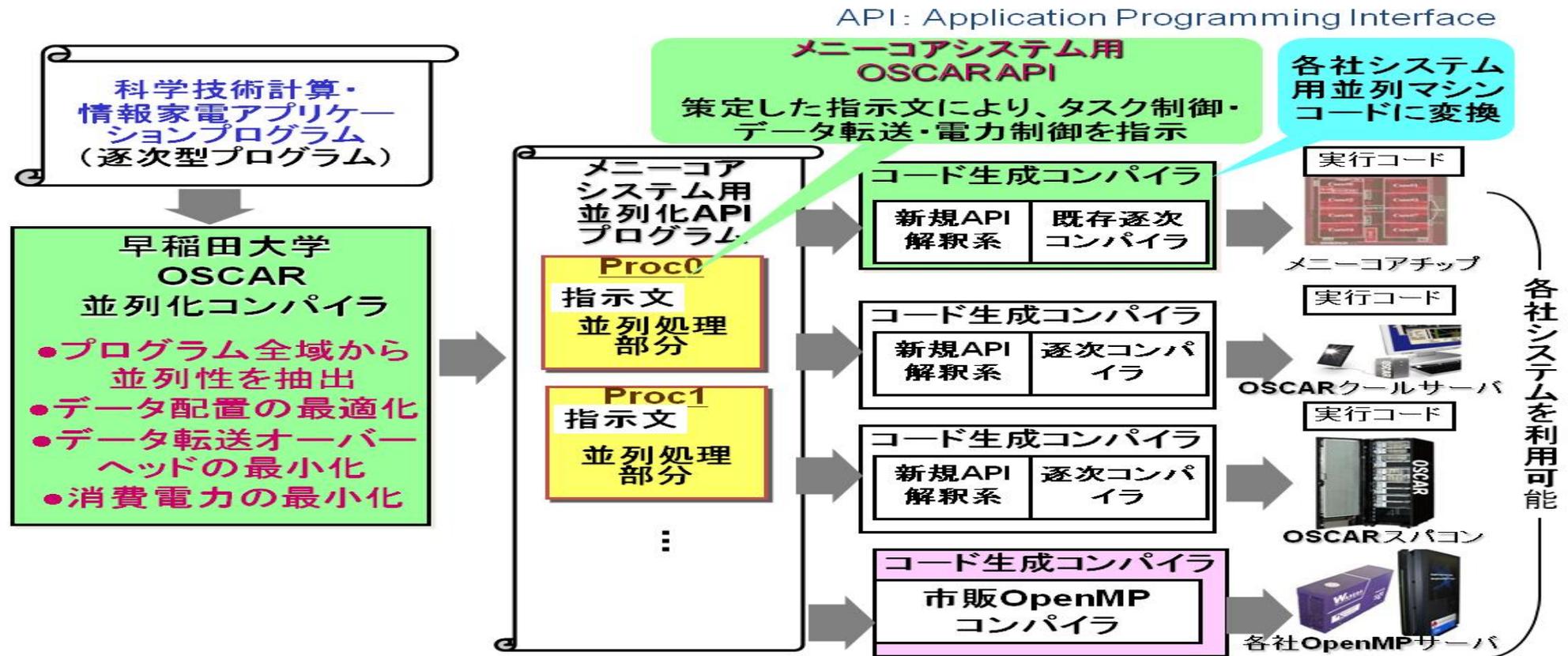
2プロセッサへの割り当て

OSCARコンパイラが自動生成するマルチコアAPI (OpenMP互換)利用、階層マルチグレイン 並列プログラムのイメージ



デファクトスタンダードを目指すOSCAR マルチコア・メニーコアAPI

IT・半導体6社と開発したOSCAR マルチコア APIは<http://www.kasahara.cs.waseda.ac.jp/>にて公開
組込からハイエンドまで各社のマルチコア(ホモジニアス/ヘテロジニアスアーキテクチャ)上で動作可能
本センターでは自動車・情報家電・ツールメーカを含め11社と共に研究開発



OSCAR マルチコアAPI に関する掲載記事の例

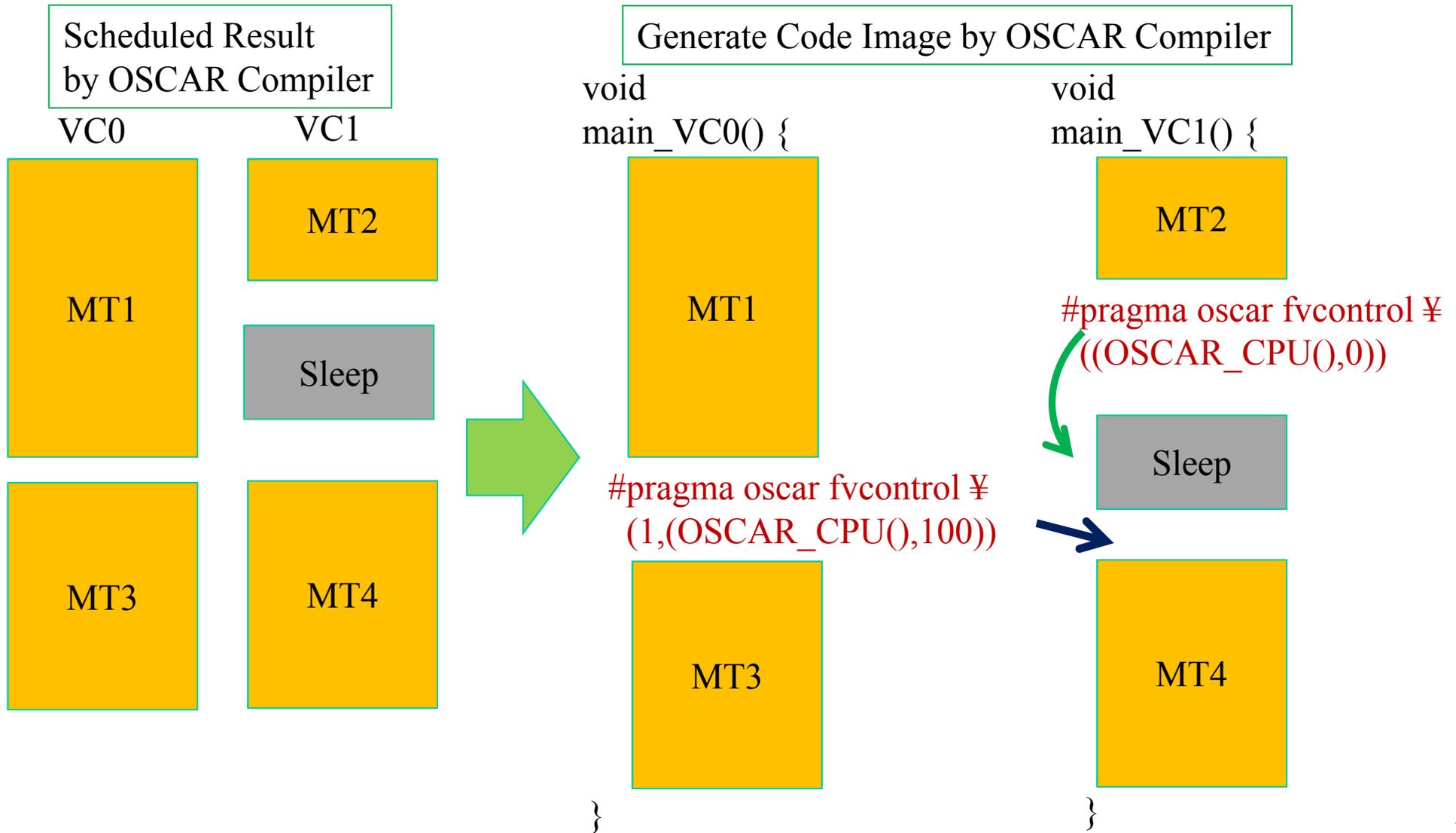
1. 日経産業新聞「情報家電用マルチコアMPU 並列処理で消費電力低減 国家プロジェクトで成果 日本勢の武器に」, Jan. 16. 2009.
2. 日経産業新聞「早大 マルチコアMPU効率利用 プログラム仕様公開」, Nov. 12. 2008.
3. 日本経済新聞「情報家電向けの並列処理ソフト 早大・日立などが開発」, Jun. 01. 2007.
4. EDN Japan, No.95, pp.17「並列化コンパイラ「OSCAR」向けのAPI、各社マルチコア用コードの自動生成が可能に」, Jan. 01. 2009.
5. Automotive Electronics, 2008年第2号,「間近に迫るマルチコアプロセッサ時代」, May. 01. 2008.
6. EDN Japan MAGAZINE ARTICLES, 2009年1月号「並列化コンパイラ「OSCAR」向けのAPI、各社マルチコア用コードの自動生成が可能に」, Jan. 01. 2009.
7. 日経エレクトロニクス Tech On「早大と国内半導体メーカー、並列実行や電力制御をコンパイラに指示する標準APIを策定」, Nov. 14. 2008.
8. Nikkei Electronics Tech On "Group Develops Standard API to Give Parallel Execution, Power Control Orders to Compiler", Nov. 16. 2008.
9. 日経BP 先端技術事業化「早稲田大学の笠原教授ら、企業6社とのプロジェクトで実時間並列処理向けAPIを開発、2008年11月から公開」, Nov. 14. 2008.

公開OSCAR API v1.0の指示文

- ▶ 並列実行API
 - ▶ parallel sections (*)
 - ▶ flush (*)
 - ▶ critical (*)
 - ▶ execution
- ▶ メモリ配置API
 - ▶ threadprivate (*)
 - ▶ distributedshared
 - ▶ onchipshared
- ▶ 同期API
 - ▶ groupbarrier
- ▶ データ転送API
 - ▶ dma_transfer
 - ▶ dma_contiguous_parameter
 - ▶ dma_stride_parameter
 - ▶ dma_flag_check
 - ▶ dma_flag_send
- ▶ 電力制御API
 - ▶ fvcontrol
 - ▶ get_fvstatus
- ▶ タイマーAPI
 - ▶ get_current_time

(* OpenMPからの指示文)

Low-Power Optimization with OSCAR API

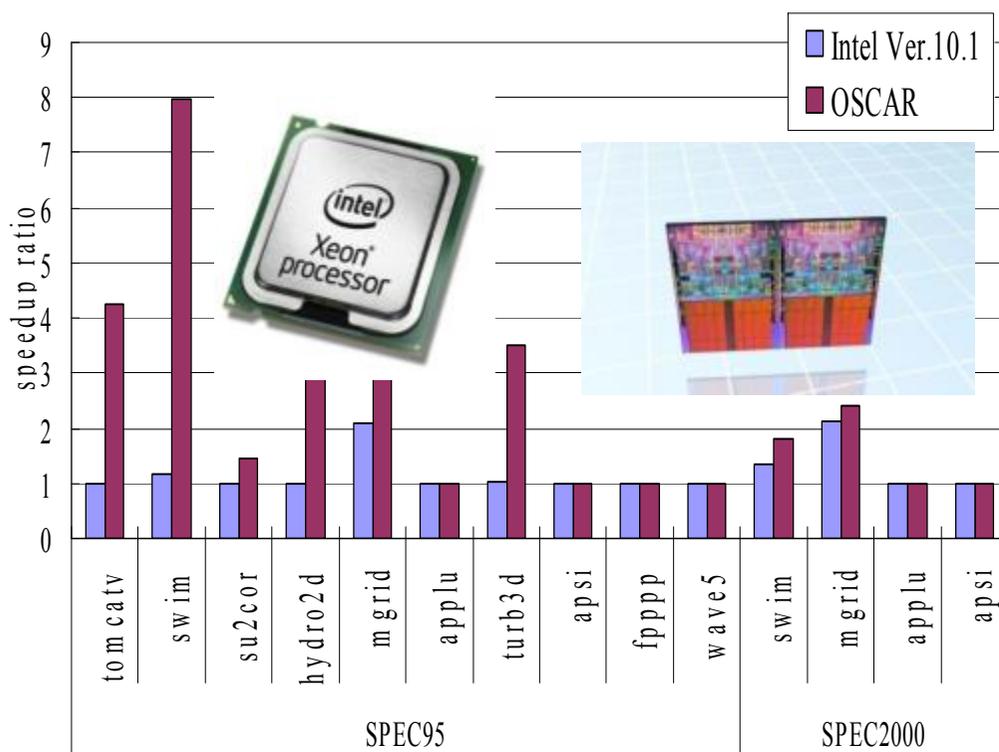


現状：世界最高性能のOSCARコンパイラの性能

インテル・IBMマルチコアサーバ上でそれぞれ2倍・3倍以上の高速化

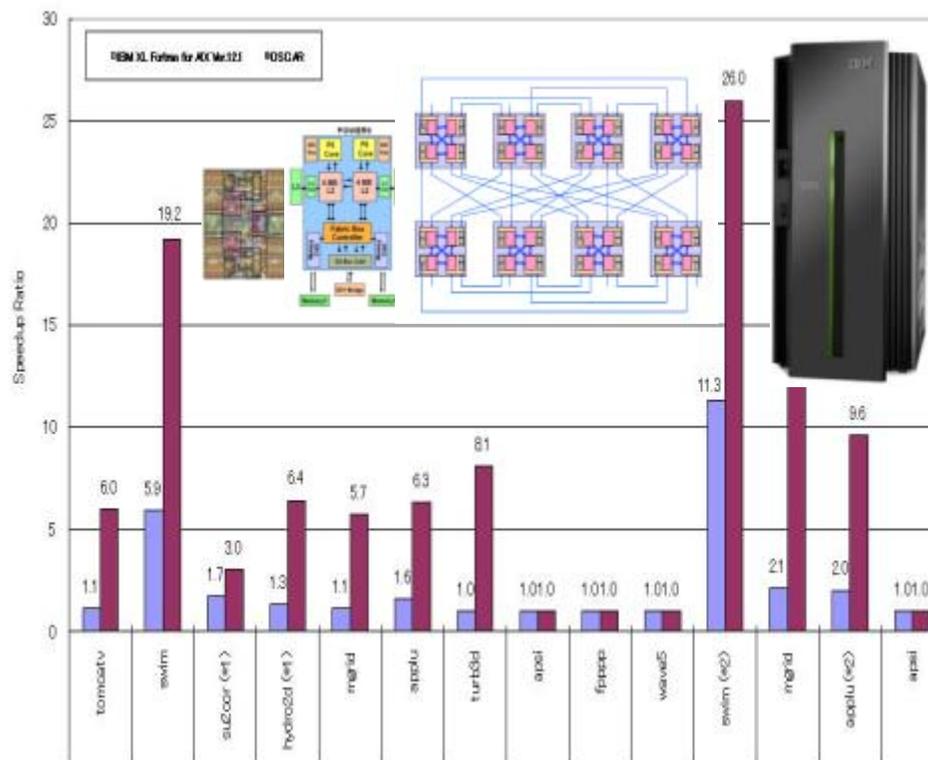
インテル クアッドコアXeonプロセッサ上での 早稲田大学 OSCARコンパイラの性能

インテル・マルチコア上で
インテルコンパイラに比べ **2.1** 倍速度向上



IBM p6 595 Power6 (4.2GHz) ベース 32コア SMP サーバ上での早稲田大学OSCARコンパイラの性能

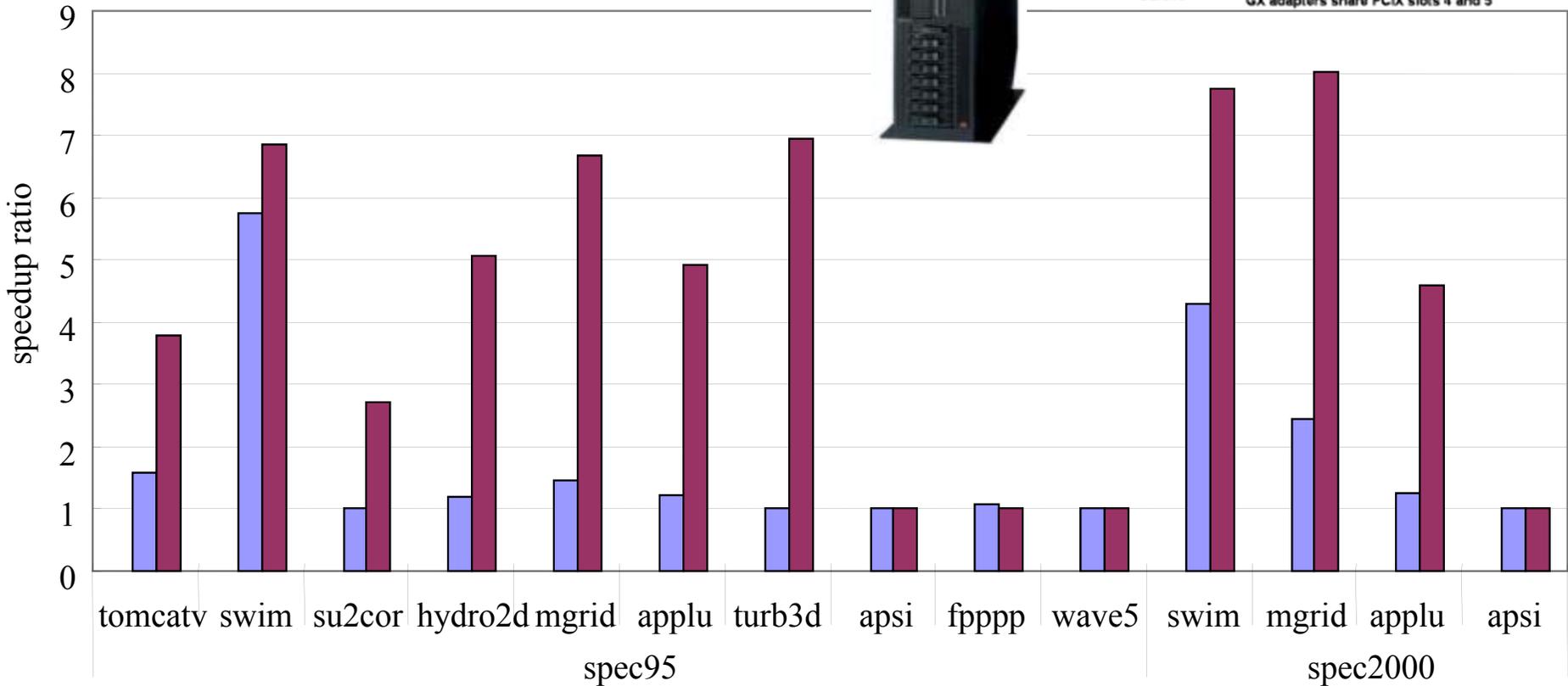
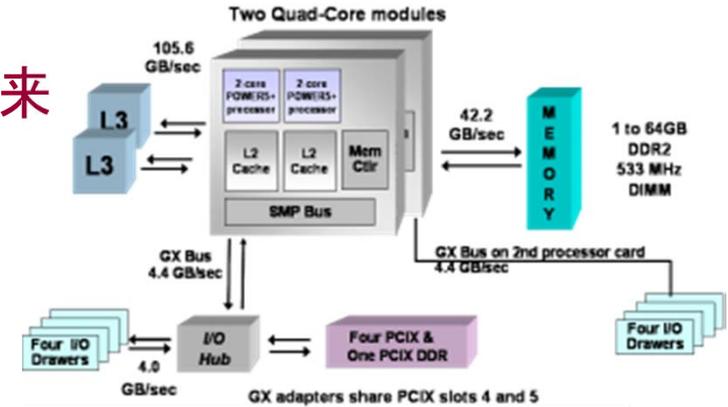
IBM最新サーバ上で
IBMコンパイラに比べ **3.3** 倍速度向上



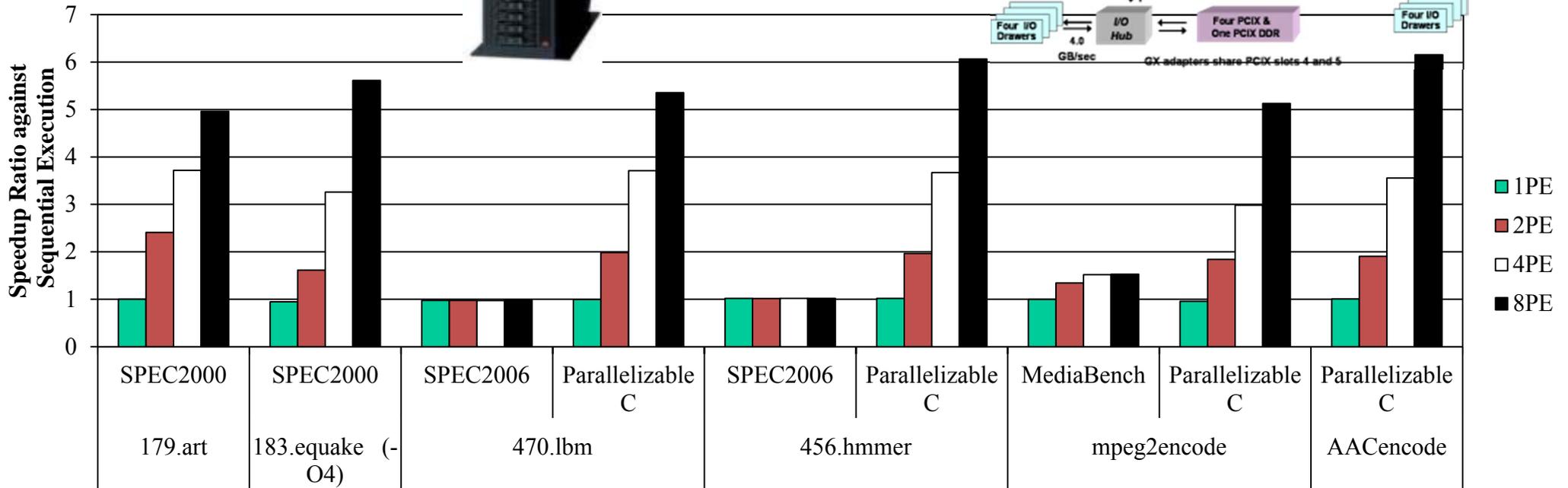
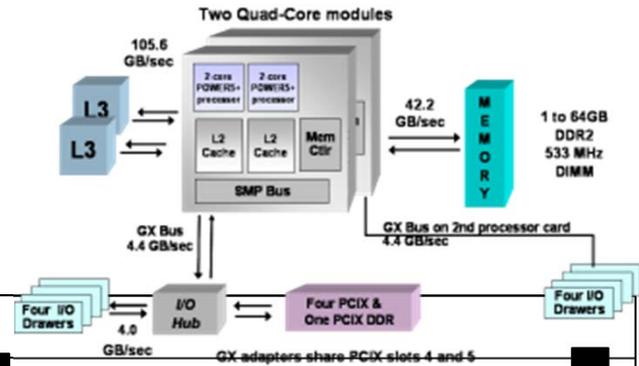
IBMサーバp550q上でのOSCAR並列化コンパイラの性能

8プロセッサコア・マルチプロセッサシステム上で従来の
ループ並列化に対し、2.7倍の高速化

- ループ並列化
- マルチグレイン並列化



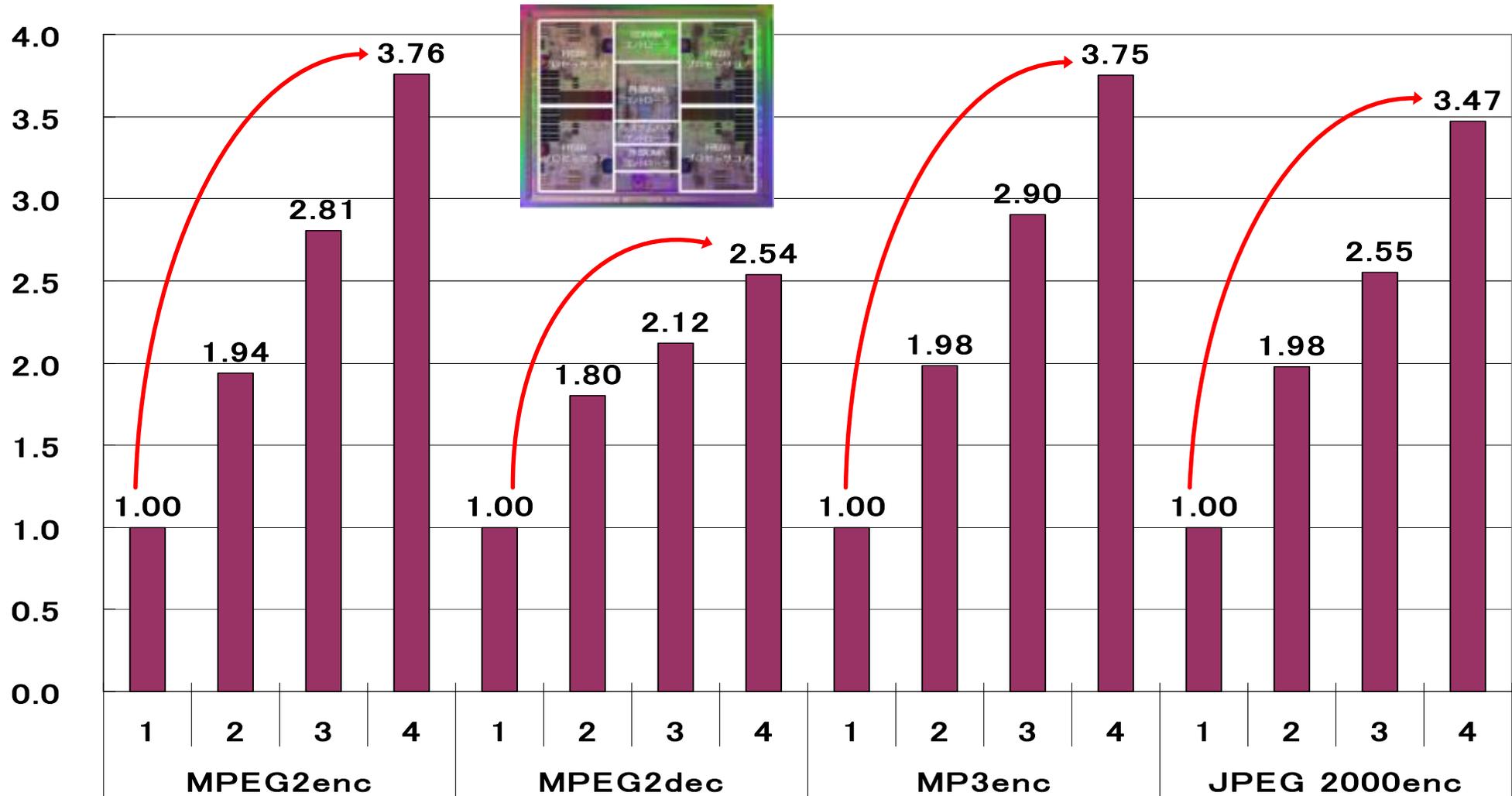
IBM p5 550Q Server (8 コア) におけるCプログラム自動並列化結果



Power5+ @1.5GHz x 2 cores x 4 chips
 L1 I\$: 64KB, L1 D\$: 32KB
 L2\$: 1.9MB /chip, L3\$: 36MB /chip
 SMT: Disabled

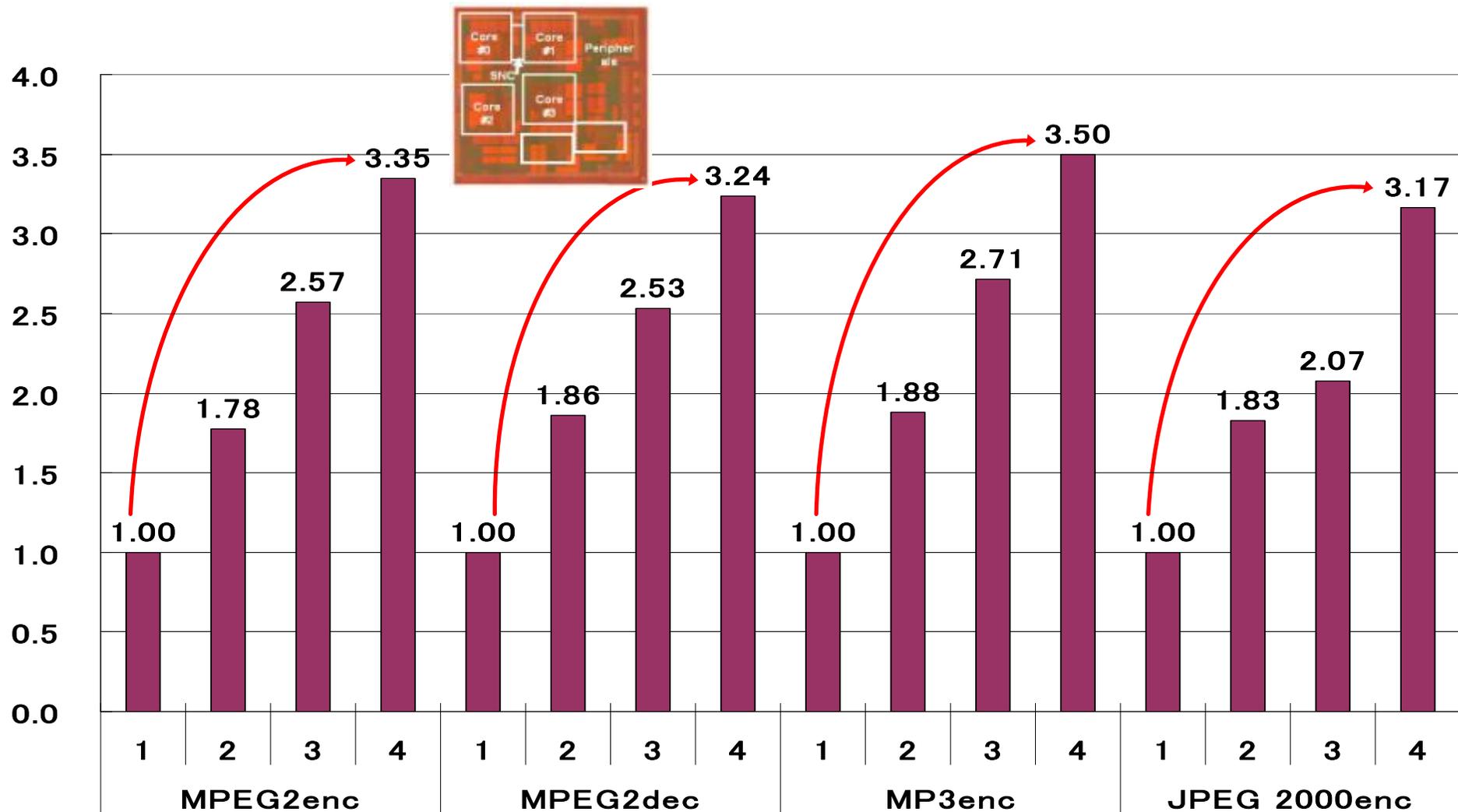
逐次実行に対して
 平均5.54倍の速度向上

Performance of OSCAR Compiler Using the multicore API on Fujitsu FR1000 Multicore



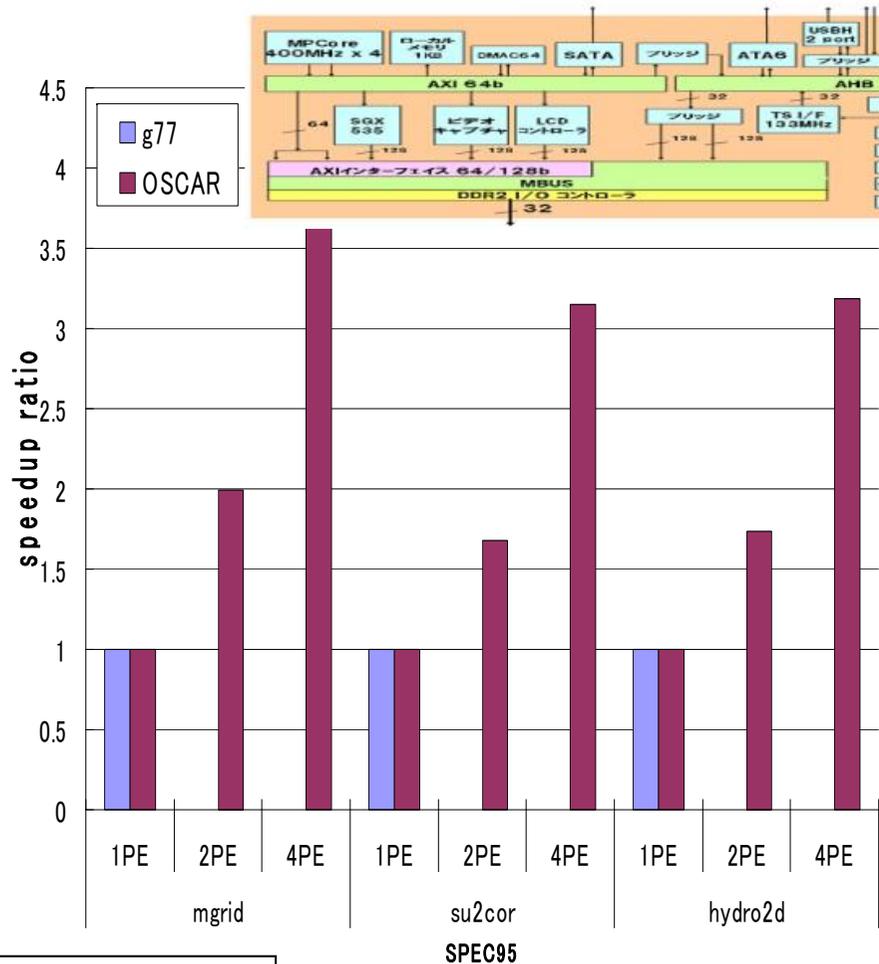
3.38 times speedup on the average for 4 cores against a single core execution

Performance of OSCAR Compiler Using the Developed API on 4 core (SH4A) OSCAR Type Multicore

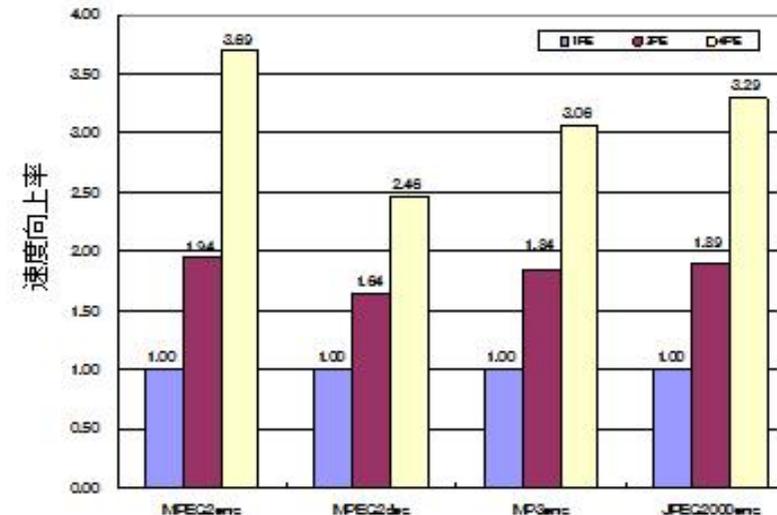


3.31 times speedup on the average for 4cores against 1core

Performance of OSCAR compiler on NEC NaviEngine(ARM-NEC MPcore)



NaviEngine上での
メディアアプリケーションによる
OSCARコンパイラ評価



•4プロセッサで、平均3.13倍の速度向上率

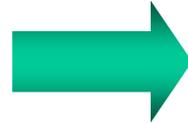
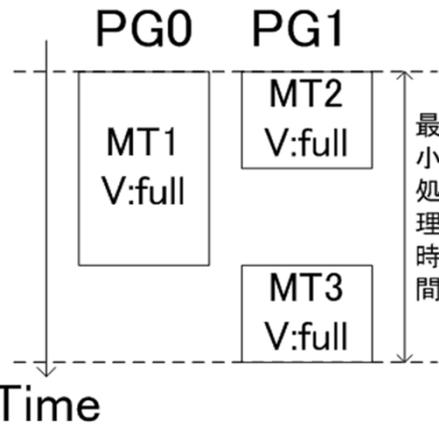
Compile Option : -O3

- OSCAR compiler gave us 3.43 times speedup against 1 core for Fortran and 3.13 for C on ARM/NEC MPCore with 4 ARM 400MHz cores

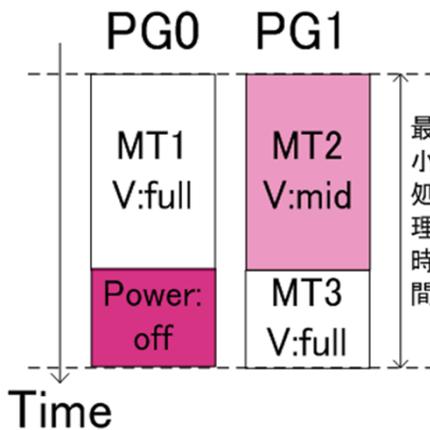
周波数電圧 (FV) 制御と電源制御による低消費電力化

処理ユニット負荷不均衡時の電源・周波数電圧制御

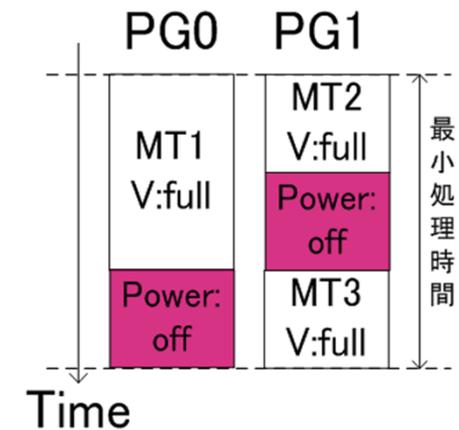
スケジューリング結果



FV制御

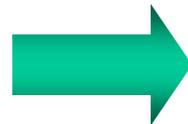
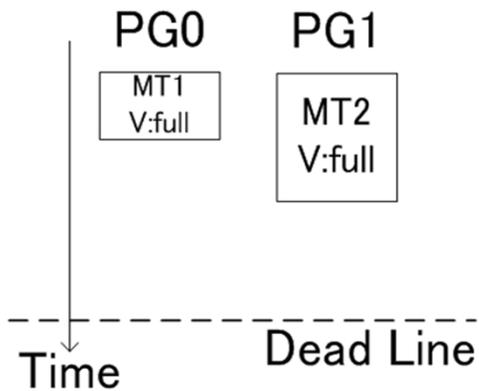


電源制御

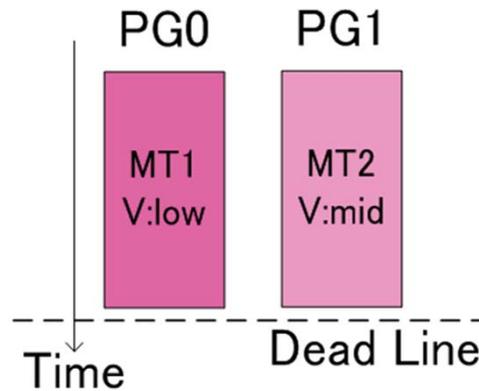


デッドライン制約を考慮した電源・周波数電圧制御

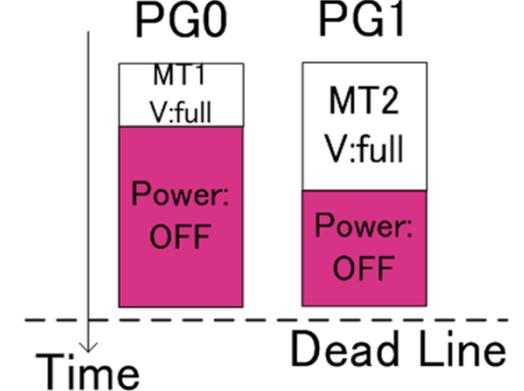
スケジューリング結果



FV制御

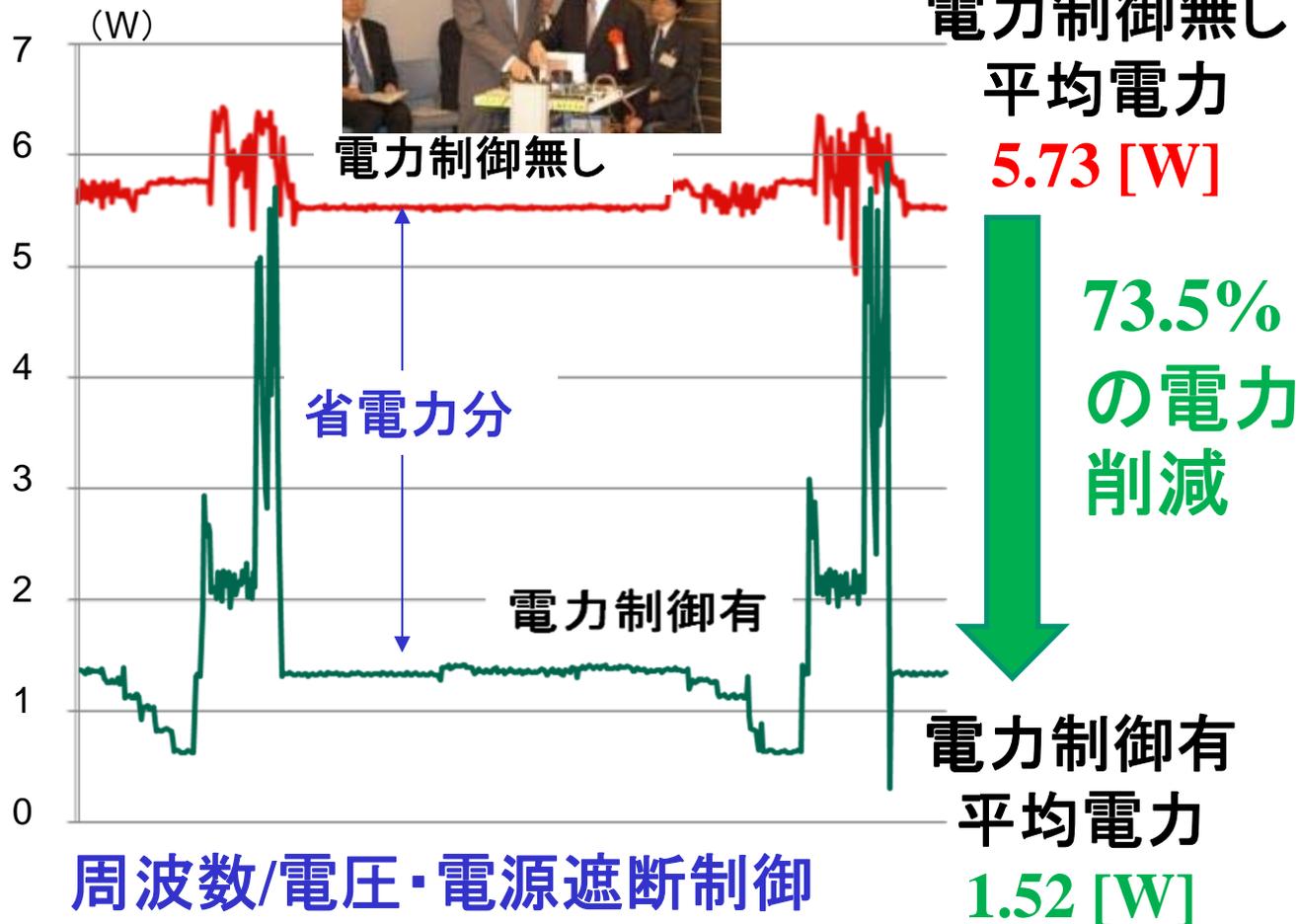
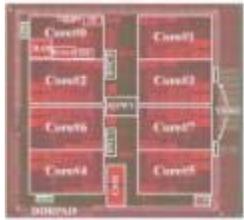


電源制御



現状：世界唯一コンパイラによる消費電力削減に成功

NEDOプロジェクトで開発した低消費電力
マルチコア(8コア)上でのマルチメディア処理

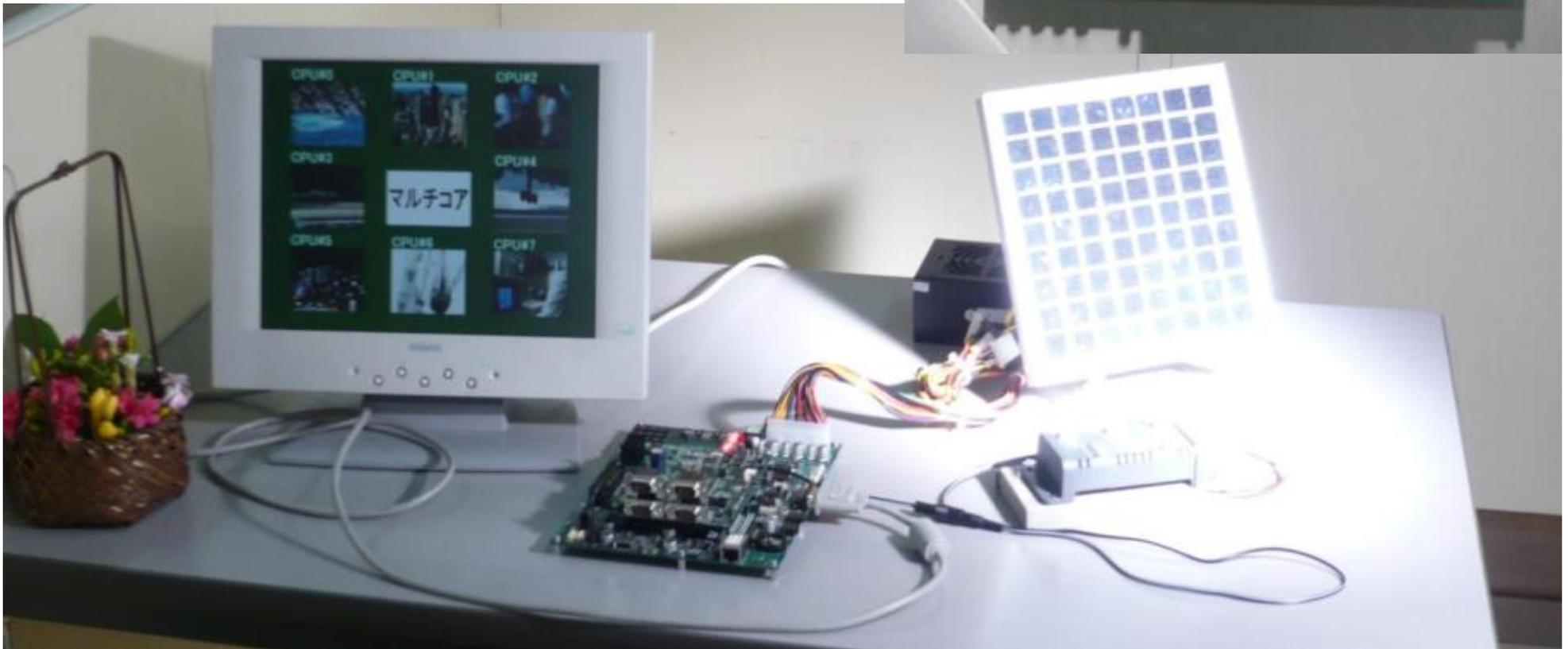


太陽電池で駆動可

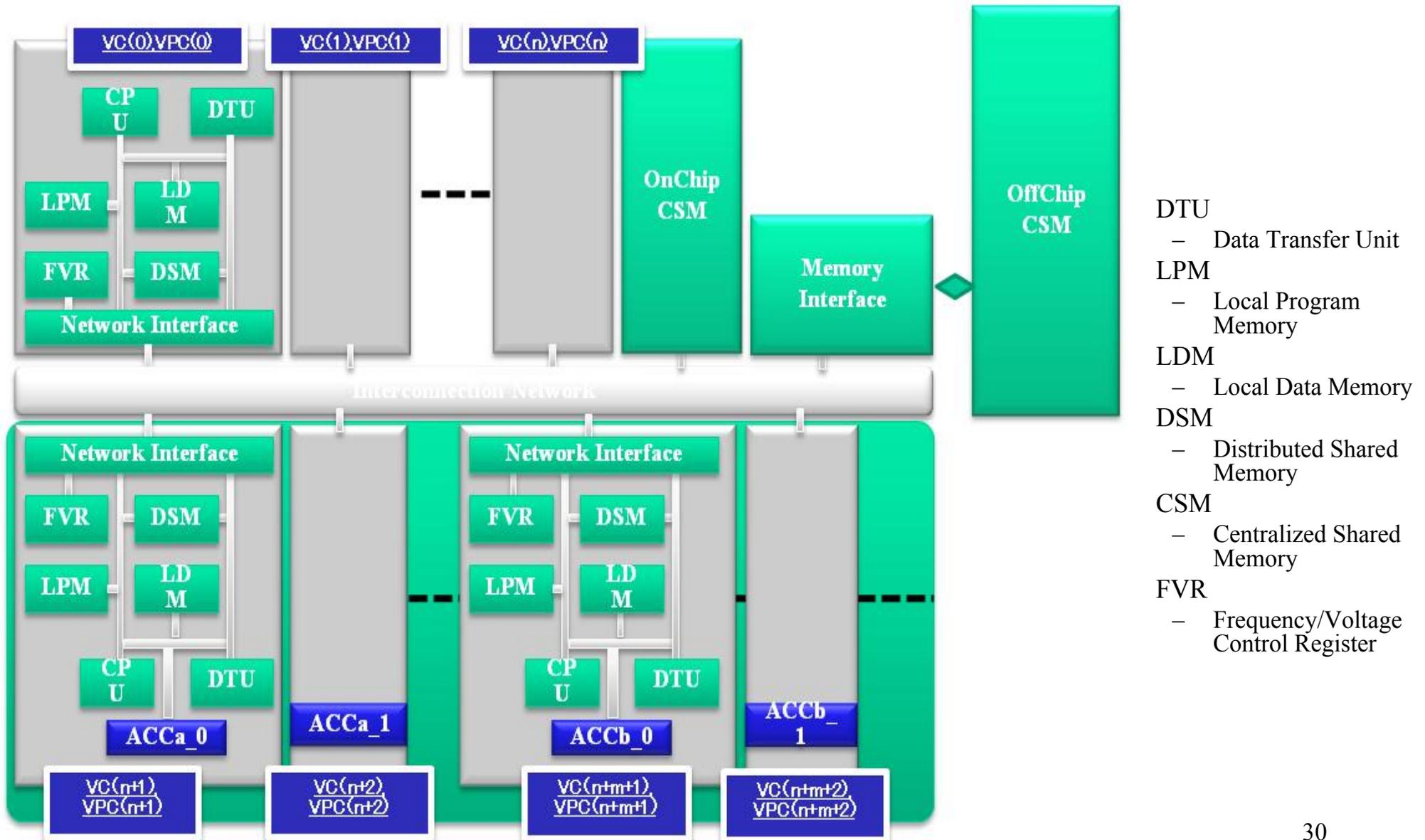


ソーラパネル駆動可能な 低消費電力高性能マルチコア RP2(SH4A 8コア集積)

- クリーンエネルギーで駆動可
 - 電力供給が困難な場所での使用可能
 - 災害時でも使用可能



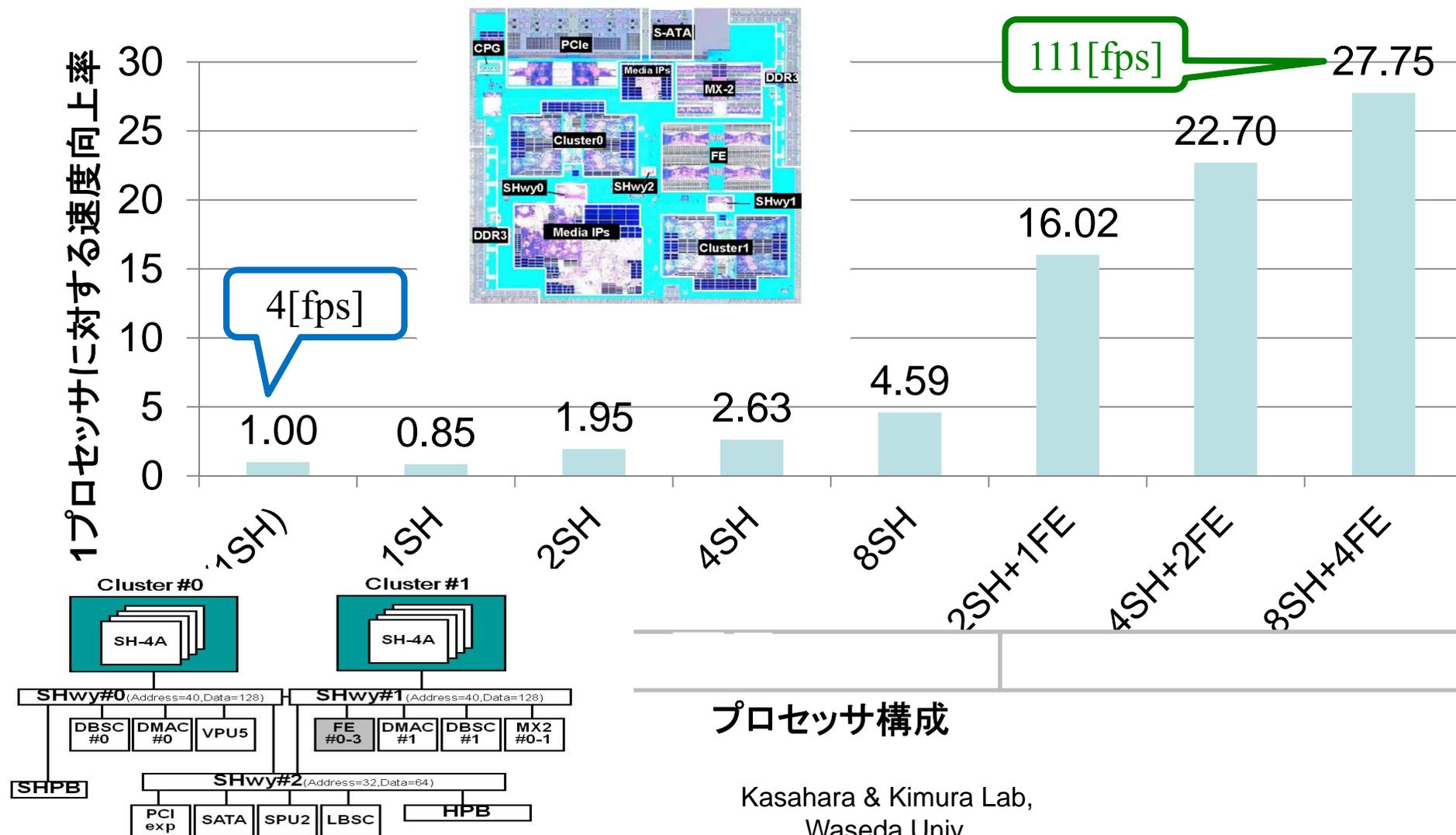
OSCAR Heterogeneous Multicore



ヘテロジニアスマルチコアRP-X上での処理性能

NEDO情報家電用ヘテロジニアスマルチコアプロジェクト(2006-09)

-画像動作追従のためのオプティカルフロー演算のコンパイラ自動並列化(世界初)-



Y. Yuyama, et al., "A 45nm 37.3GOPS/W Heterogeneous Multi-Core SoC", ISSCC2010

Kasahara & Kimura Lab,
Waseda Univ.

オプティカルフロー(ライブラリ利用)に対するリアルタイム処理時の消費電力制御

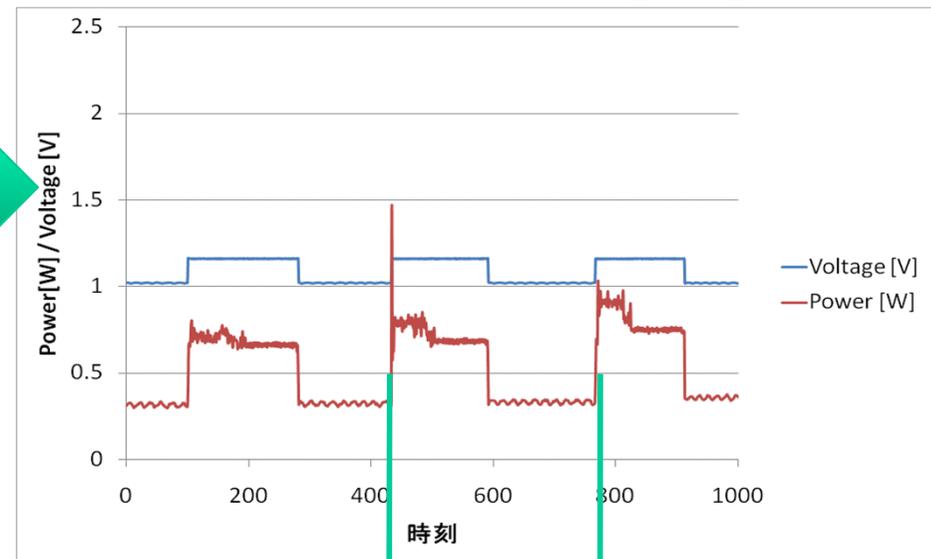
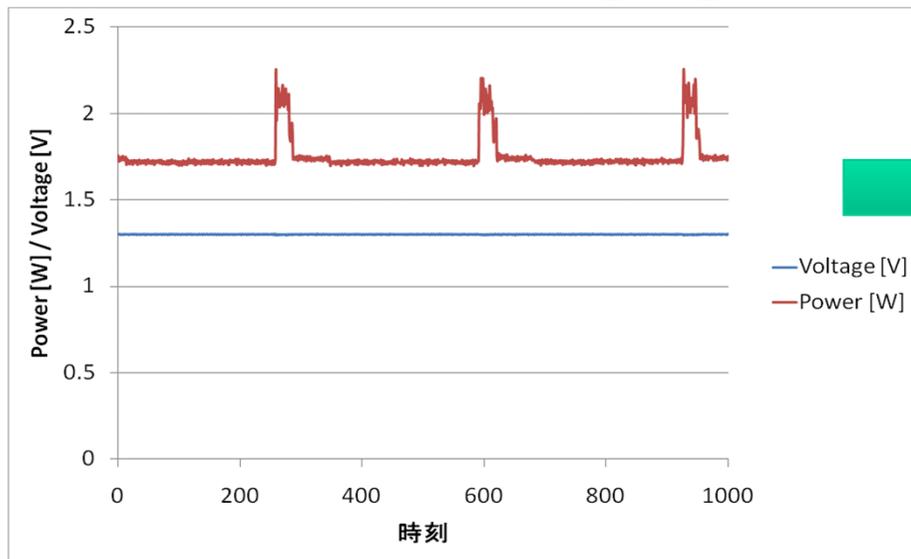
コンパイラ制御なし

コンパイラ制御適用

およそ70[%]の電力削減

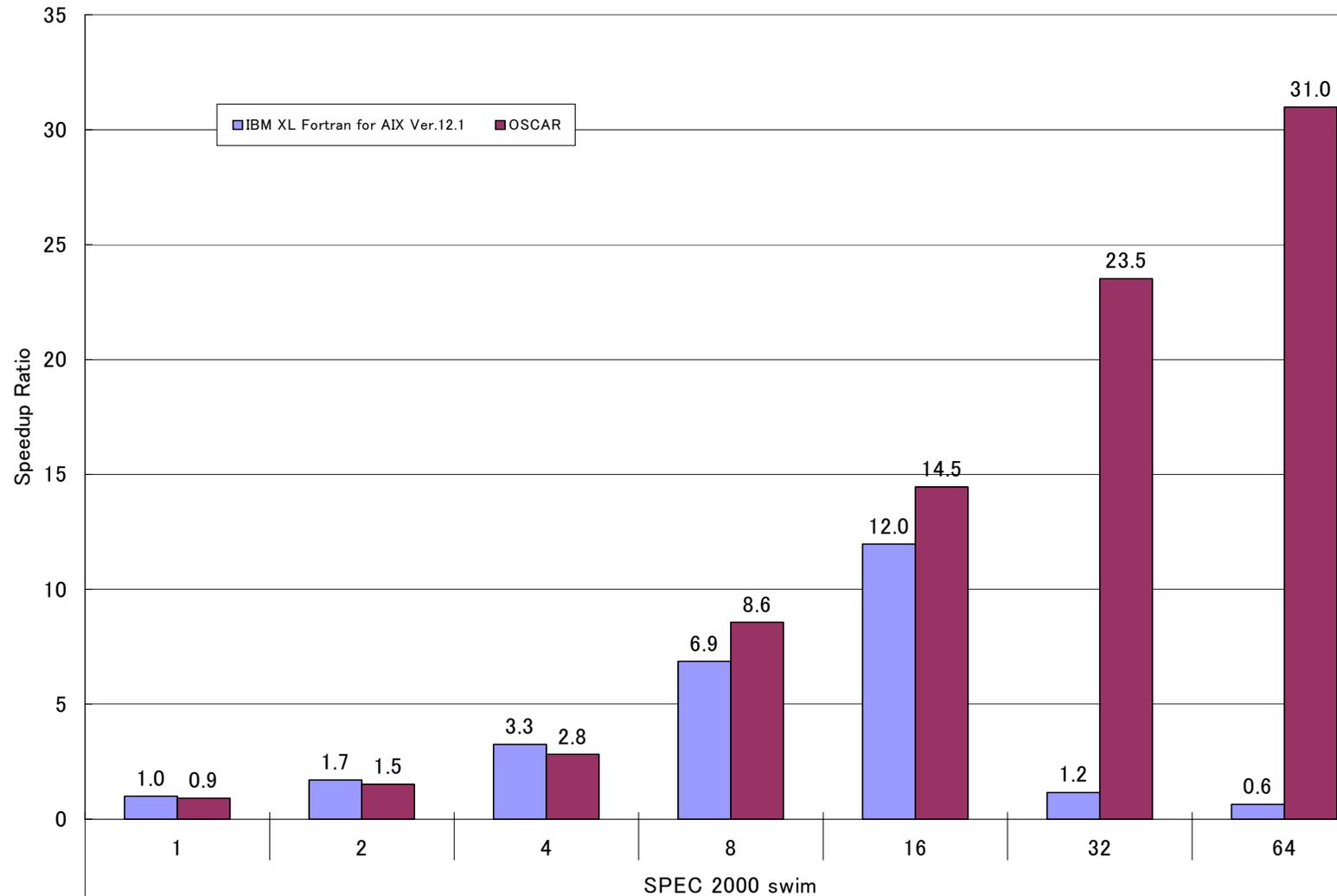
平均1.76[W]

平均0.54[W]



1周期 : 33[ms]
→30[fps]

Performance of OSCAR Compiler on IBM p6 595 Power6 (4.2GHz) based 64-core SMP Server



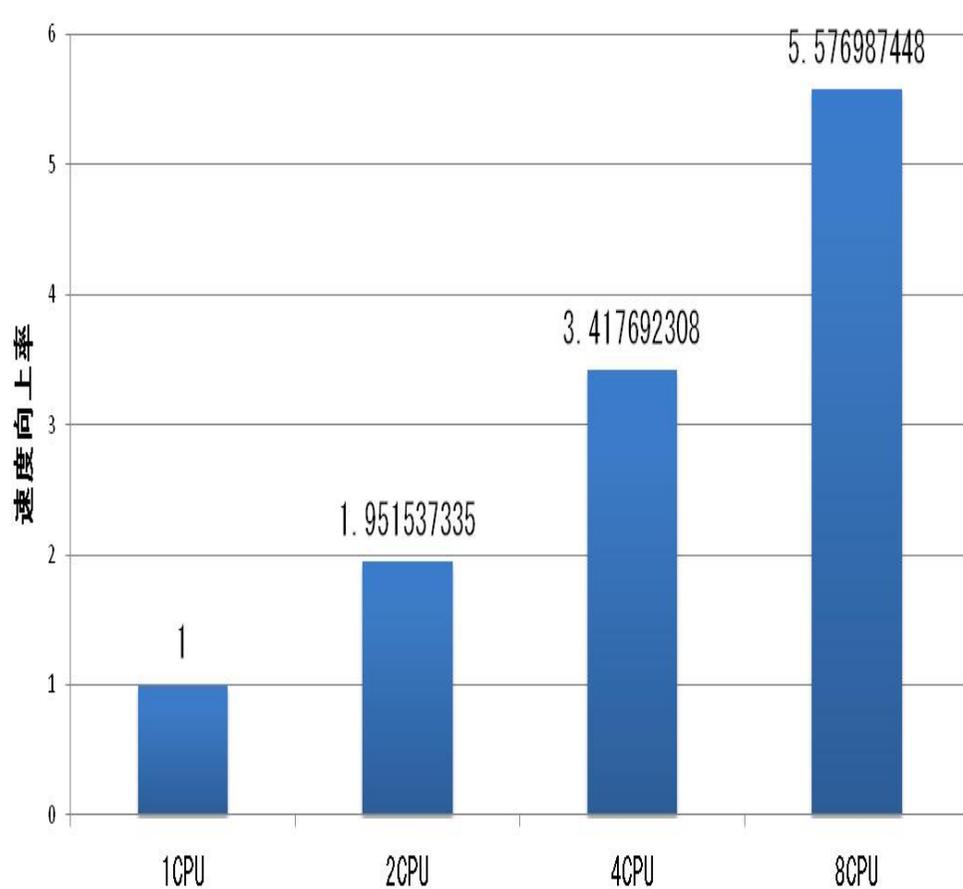
Compile Option:

Sequential: -O5 -bmaxdata:64000000000 -q64 -qarch=pwr6

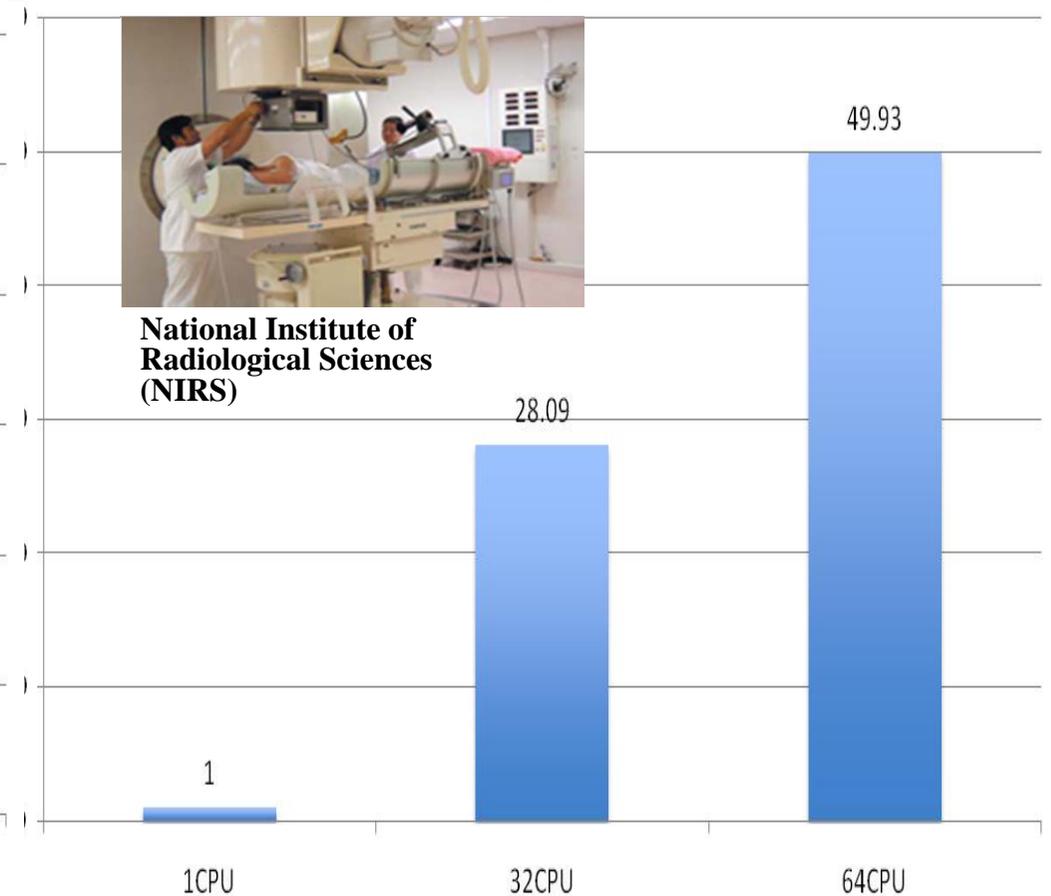
XLF: -O5 -qsmp=auto -bmaxdata:64000000000 -q64 -qarch=pwr6

OSCAR: -O5 -qsmp=noauto -bmaxdata:64000000000 -q64 -qarch=pwr6

Cancer Treatment Carbon Ion Radiotherapy



5.6 times speedup by 8 processors
Intel Quadcore Xeon 8 core SMP



50 times speedup by 64 processors
**IBM Power 7 64 core SMP
(Hitachi SR16000)**

まとめ

グリーン・コンピューティング・システム研究開発センターでの
産官学連携研究開発(持続的強化のための人材育成含む)

1.環境を守るコンピューティング・システム

太陽光電力等クリーンエネルギーで動作し、自然冷却可能な
超低消費電力(マルチコア・メニーコア)プロセッサ・システムの
ハードウェア・ソフトウェア・応用技術

2.命を守るコンピューティング・システム

災害(地震・津波・溶岩流)スーパーリアルタイムシミュレーシ
ョン技術、医療(重粒子線ガン治療、内視鏡、脳梗塞診断補助)
等並列ソフトウェア技術・アーキテクチャ技術

3.産業競争力を守るコンピューティング・システム

我が国の主要産業である自動車、情報家電、ロボット等の安
全、安心、快適、省エネ、高機能、高生産性を実現し高付加価
値化に貢献するソフトウェア・ハードウェア・API技術