

# 組み込みマルチコアが開く 新市場とそれを支える 並列コンパイラ技術の最前線

**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

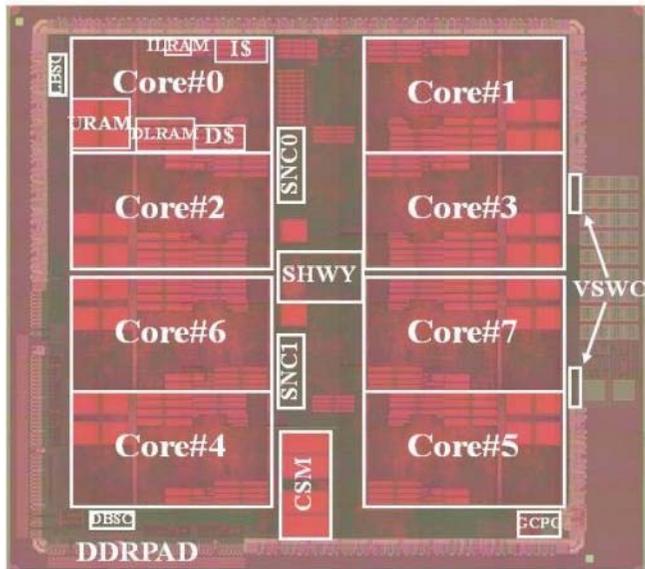
IEEE Computer Society Board of Governors

**笠原博徳**

URL: <http://www.kasahara.cs.waseda.ac.jp/>

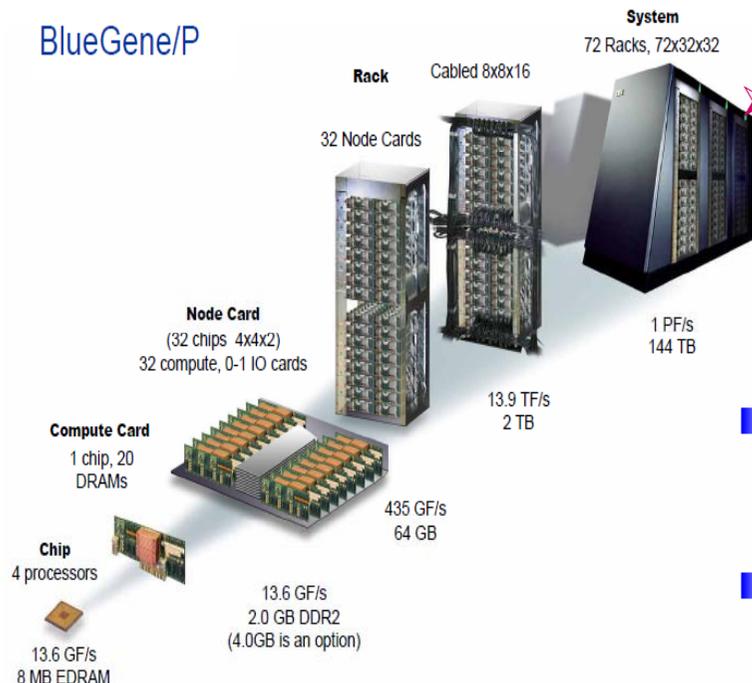
組み込みプロセッサ & プラットホーム・ワークショップ2009 平成21年4月24日(金) 9:30-10:10

# マルチコアEverywhereの時代



NEDOリアルタイム情報家電用マルチコアプロジェクト  
ルネサス試作チップ(OSCAR)標準アーキテクチャ  
BlueGene/P

BlueGene/P



## ■ 組み込みプロセッサからスパコンまで

### ➤情報家電用マルチコア

カーナビ, 携帯電話, ゲーム, デジタルTV, DVD

IBM/ Sony/ Toshiba Cell, Fujitsu FR1000, Panasonic

Uniphier, NEC/ARM MPCore/MP211/NaviEngine

Renesas SH multi-core SHX3(4 core RP1, 8 core RP2)

Tilera Tile64, SPI Storm-1(16 VLIW cores)

### ➤PC,サーバ

Intel Quad Xeon, Core 2 Quad, Montvale,

Nehalem(8score), 80 core, Larrabee(32core)

AMD Quad Core Opteron, Phenom

### ➤WSs, Deskside & Highend Servers

IBM Power4,5,5+,6, HPCS 実効性能1PFLOP(Power7),

Sun Niagara(SparcT1,T2), Rock

### ➤スーパーコンピュータ

地球シミュレータ, 2002年3月完成, 5120ベクトルプロ

セッサ : **40TFLOPS**

IBM Blue Gene/L: **360TFLOPS**, 2005,低消費電力マルチコ

アベース128K processor chips, BG/Q 20PFLOPS (2011)

Blue Waters (2011年7月実効性能 1 PFLOPS : Power7)

## ■ アプリケーションソフトの充実,短期間システム開発,低

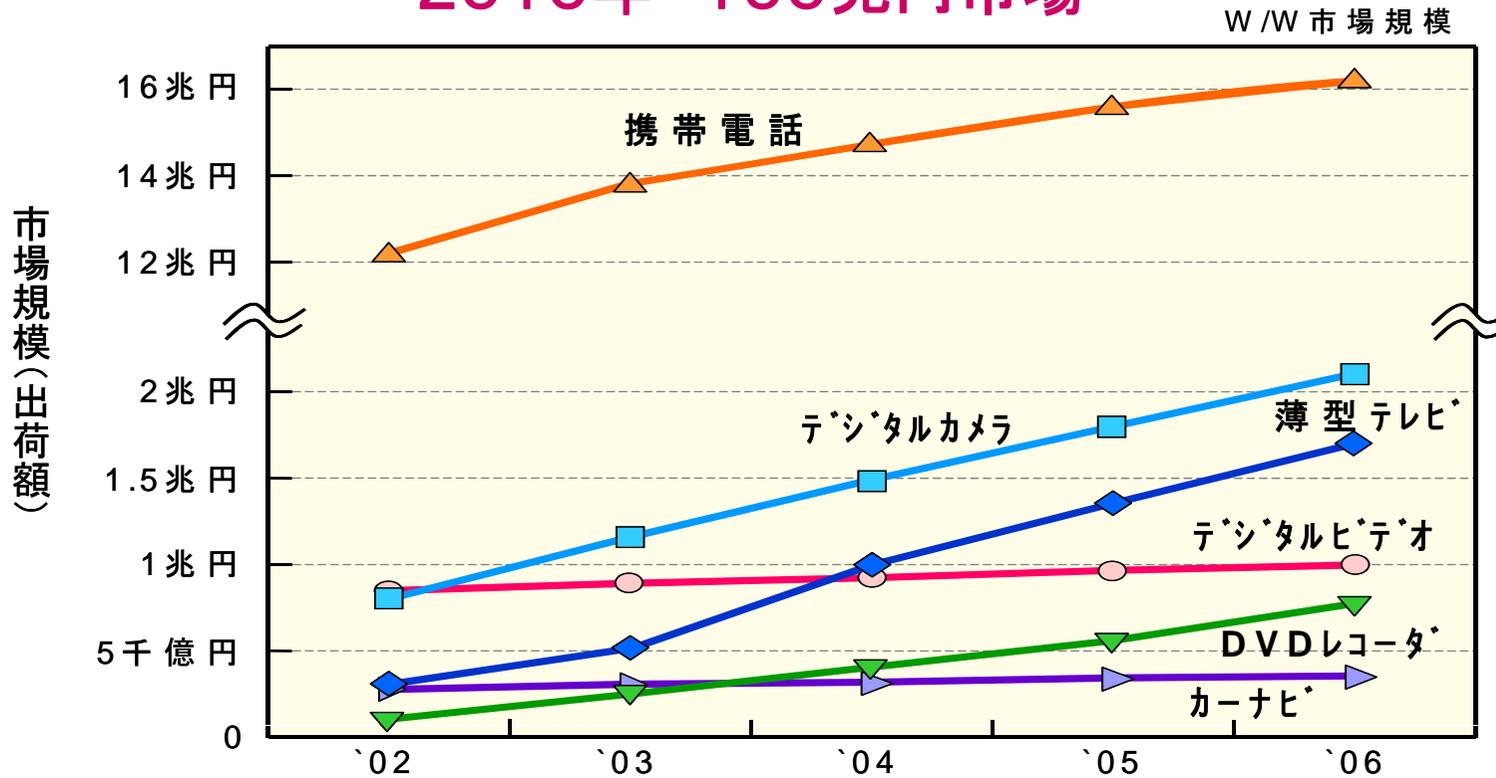
コスト, 低消費電力, 高機能化が市場競争力決定

<例>携帯電話,ゲーム,自動車

## ■ 自動並列化コンパイラ協調型マルチコアプロセッサ必要

# リアルタイム情報家電が市場を牽引

## 2010年 100兆円市場



	'03	'07	年平均成長率%
デジタルスチルカメラ(M台)	49	76	12
デジタルTV(M台)	6	27	45
DVDレコーダ(M台)	3.6	33	74
PC用DVD(記録型)(M台)	27	114	43
携帯電話(M台)	490	670	8
自動車用半導体需要(B\$)	14.0	20.9	11

2005.5.11  
 NEDOロードマップ報告会  
 電子・情報技術開発部  
 「技術開発戦略」より

# 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

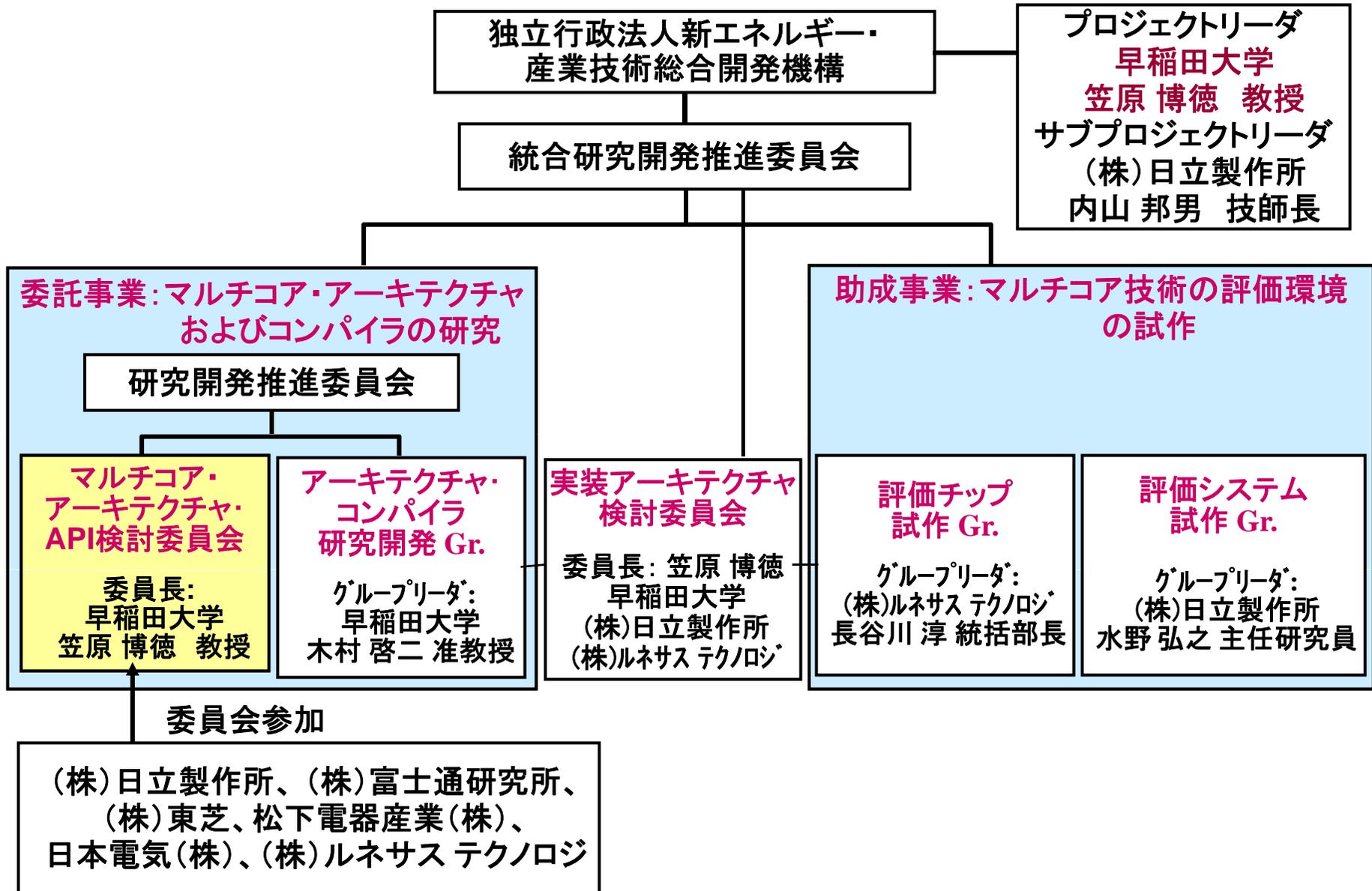
＜委託事業＞ NEDO”アドバンスト並列化コンパイラ“の成果と参加各社のプロセッサ技術を委員会及び研究により発展させ、標準的マルチコア・アーキテクチャと並列化APIを策定し、既存及び新規チップ上での性能評価を通し改良する

＜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＞

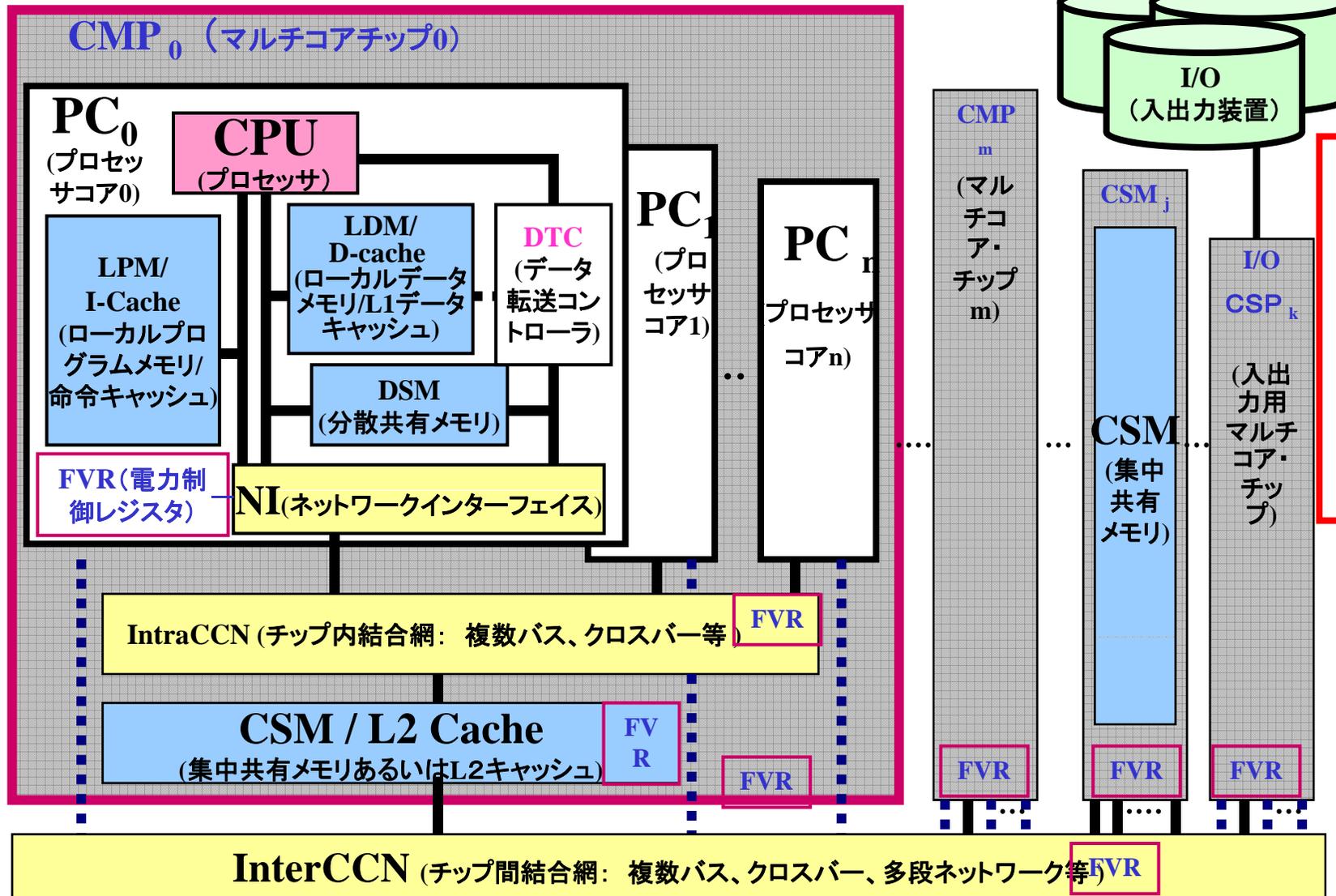
リアルタイム処理なアーキテクチャ・自然冷却可能な低消費電力性

# リアルタイム情報家電用マルチコア技術研究開発実施体制



# 標準的メモリアーキテクチャと承認されたOSCARマルチコア

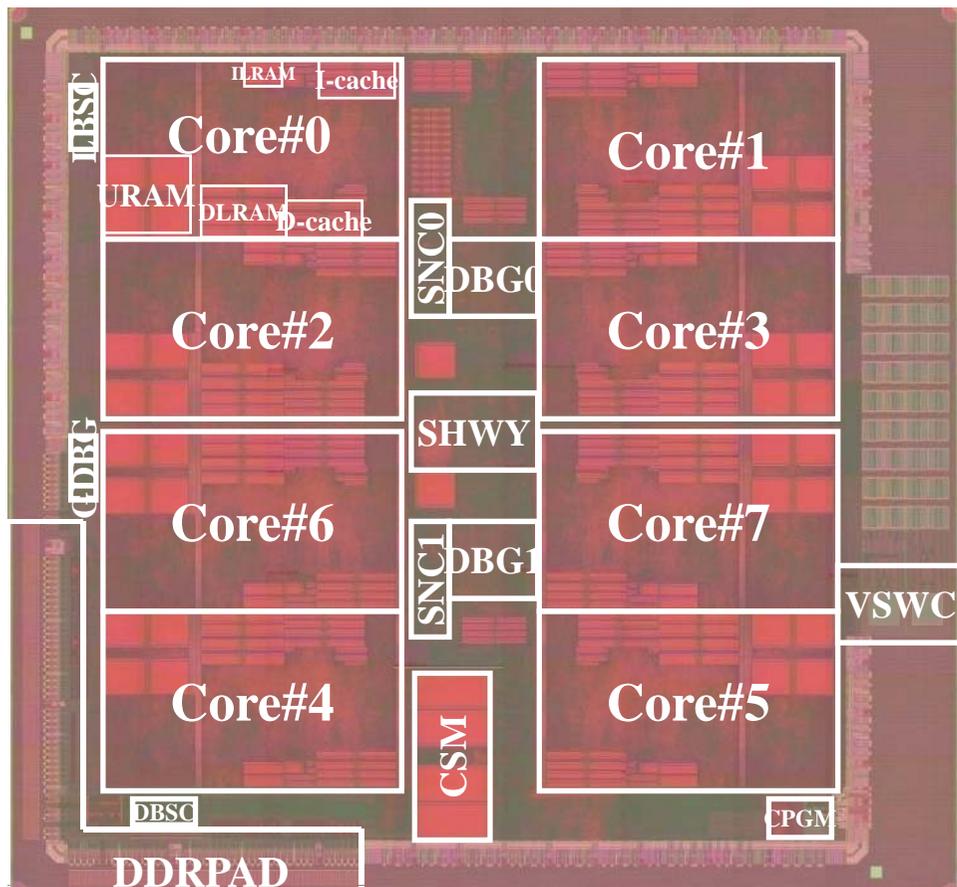
- ローカルメモリ
- 分散共有メモリ
- 集中共有メモリ(チップ内・外)
- DTC(高性能DMAC)
- 電力制御用FVR



標準メモリアーキテクチャとして  
2005年  
12月16日  
承認

# 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

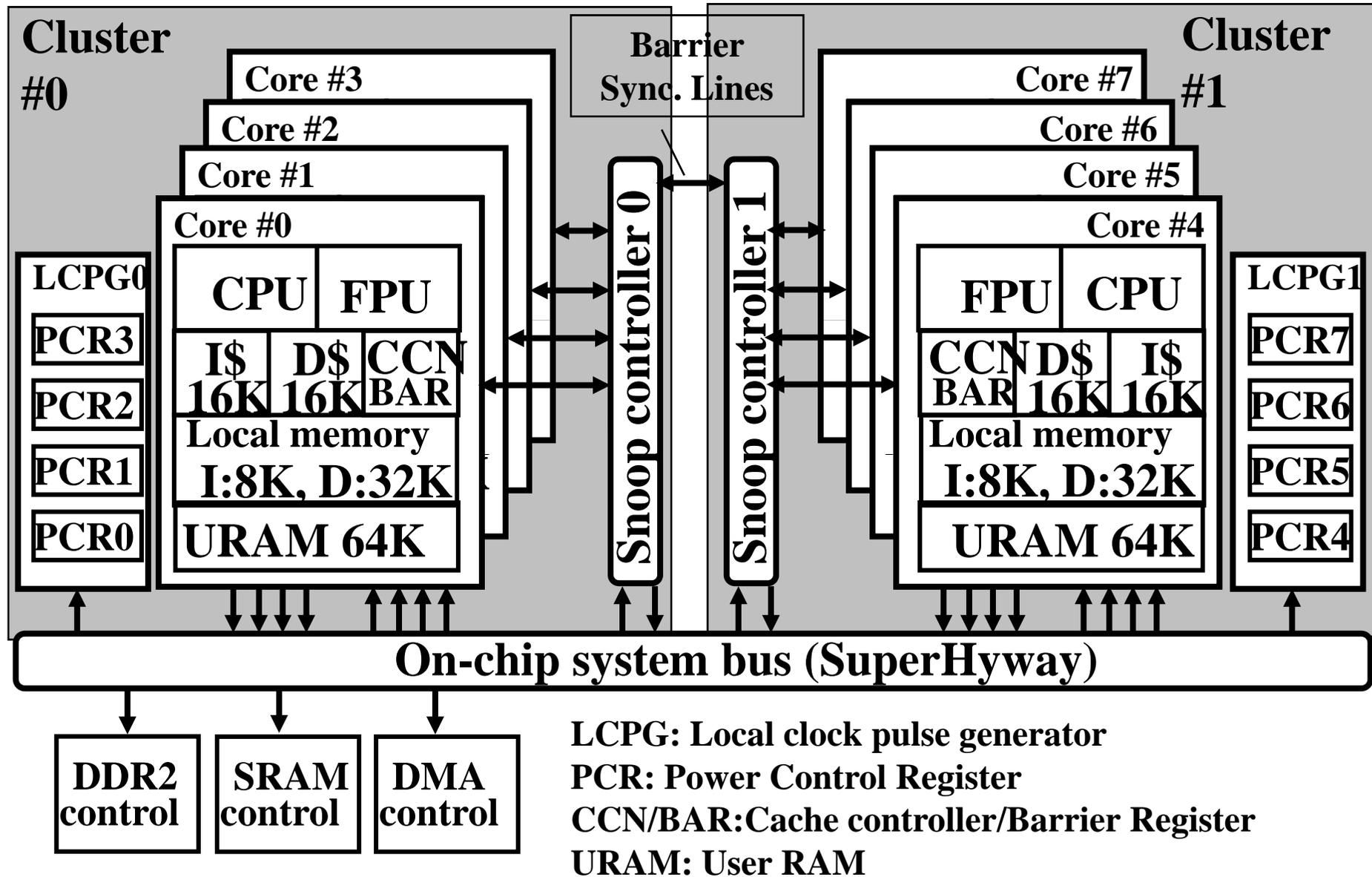


8コア集積マルチコアLSIチップ写真

プロセス	90nm CMOS, 8層メタル, 3種Vth
チップサイズ*	104.8mm <sup>2</sup> (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"> <li>・CPU毎に独立した周波数変更</li> <li>・CPUコアのクロックを停止するスリープモード</li> <li>・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</li> <li>・CPUコアの電源供給を停止するフル電源遮断モード</li> <li>・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</li> </ul>

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”

# 開発8 Core RP2 マルチコアのアーキテクチャ



# 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)



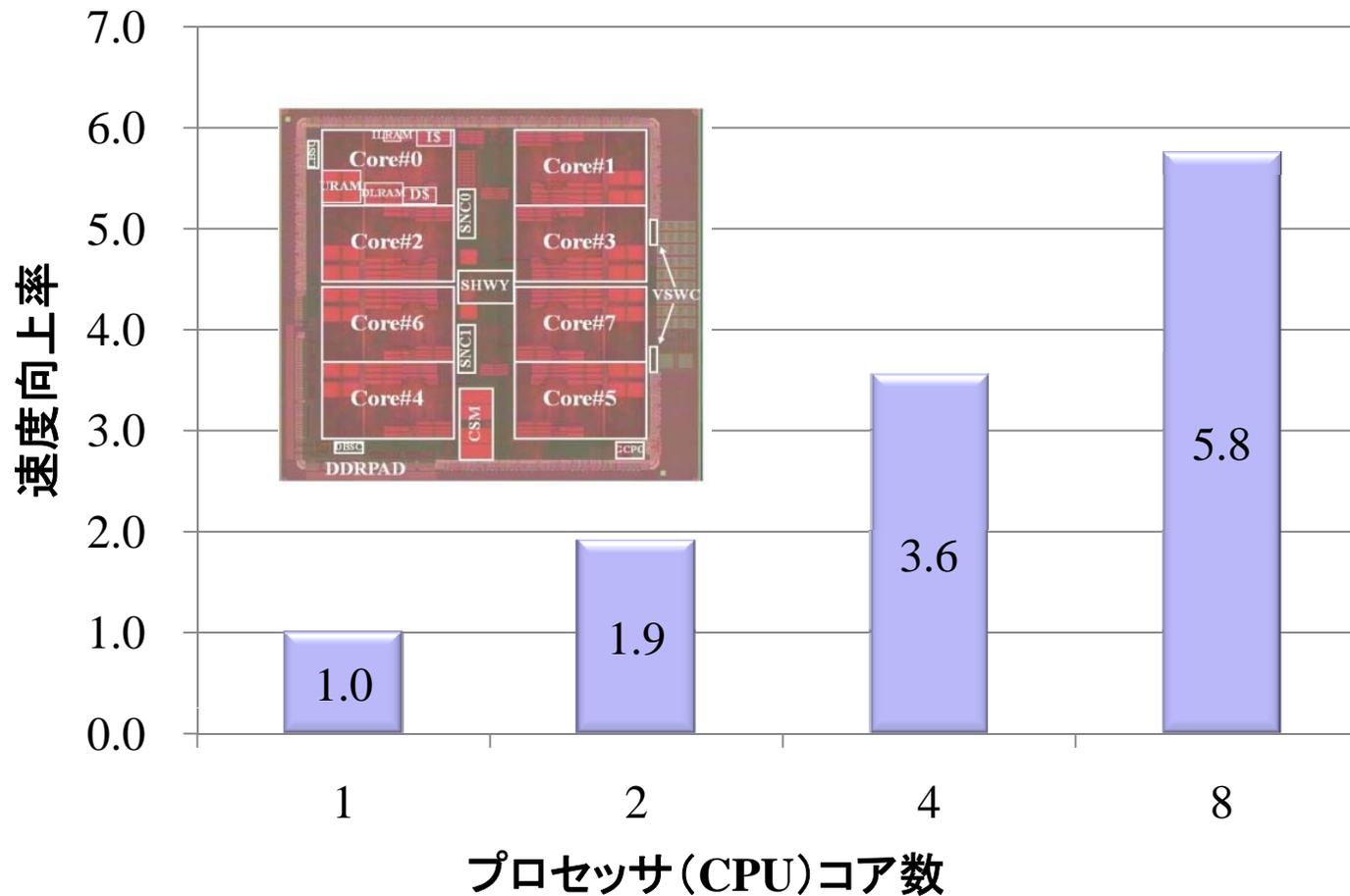
第74回総合科学技術会議の様子(3)



第74回総合科学技術会議の様子(4)

# 開発マルチコア・チップ上での 自動並列化コンパイラを用いた処理速度

オーディオ圧縮(AAC\*エンコード)処理(マルチメディア処理)  
並列化時の1プロセッサコアに対する処理速度向上率



\*) Advanced Audio Coding: ISOにおいて規格化された音声圧縮方式

# 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

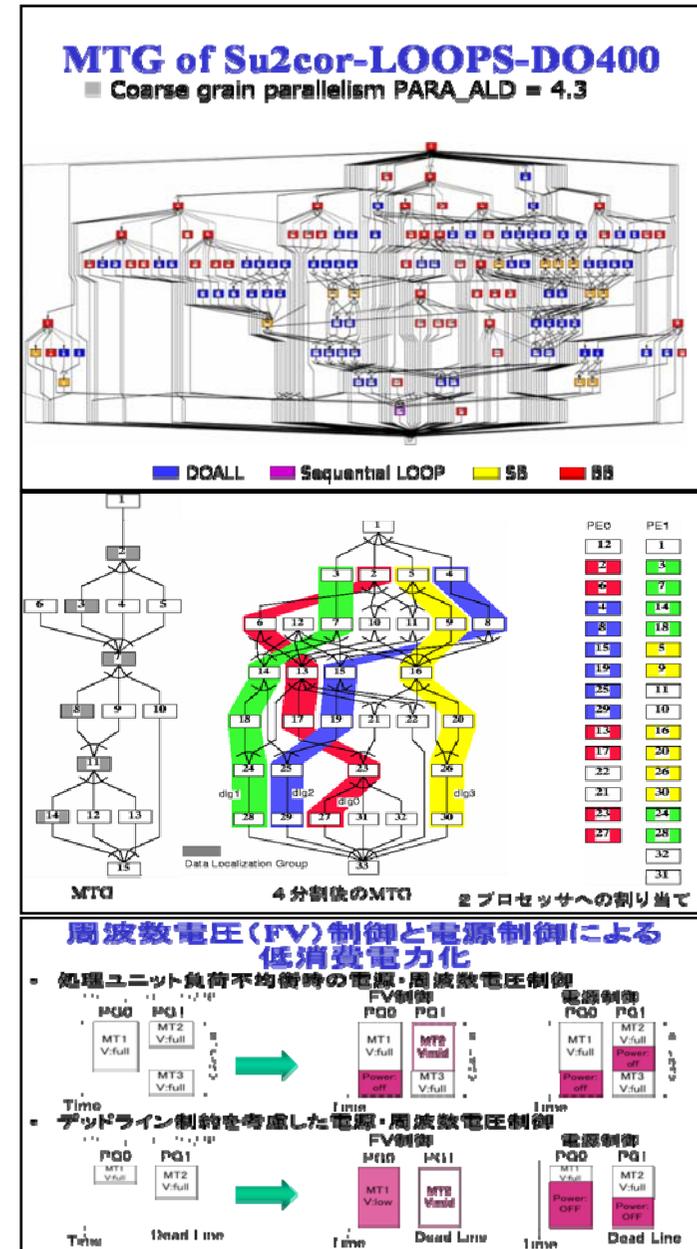
- 粗粒度タスク並列化、ループ並列化、近細粒度並列化によりプログラム全域の並列性を利用するマルチグレイン並列化機能により、従来の命令レベル並列性より大きな並列性を抽出し、複数マルチコアで速度向上

## 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

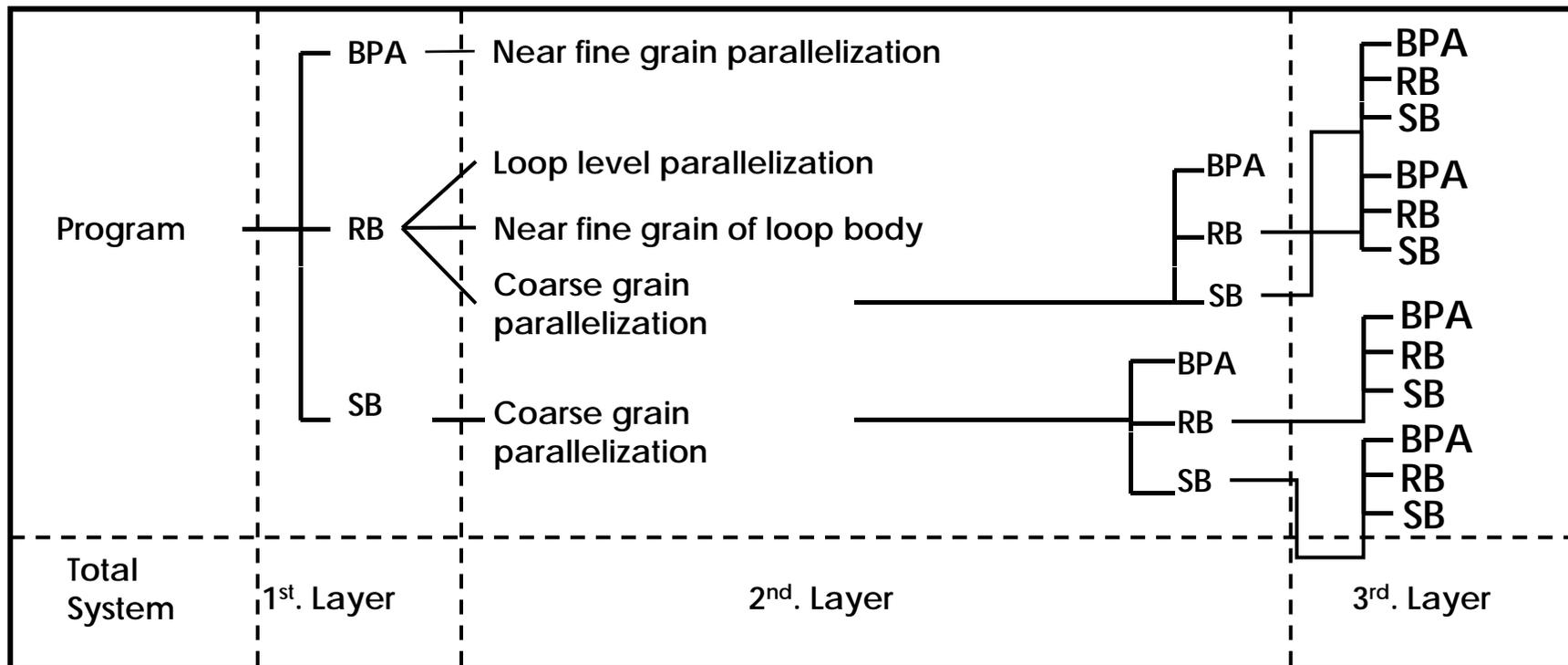
- コンパイラによる低消費電力制御機能を用いたアプリケーション内でのきめ細かい周波数・電圧制御・電源遮断により消費電力低減



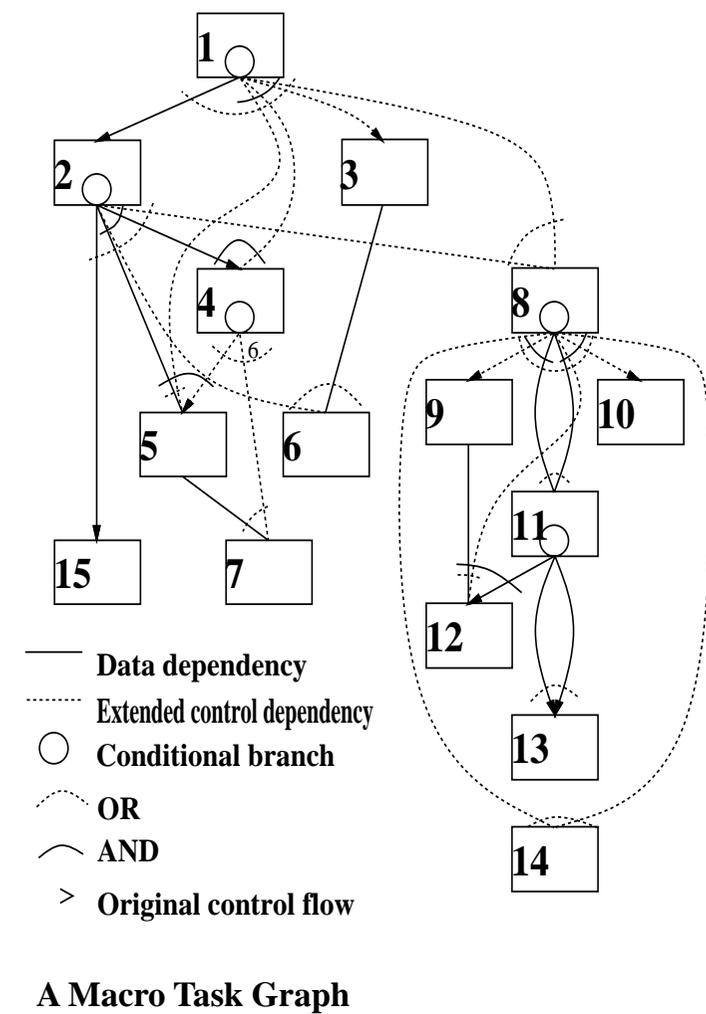
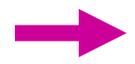
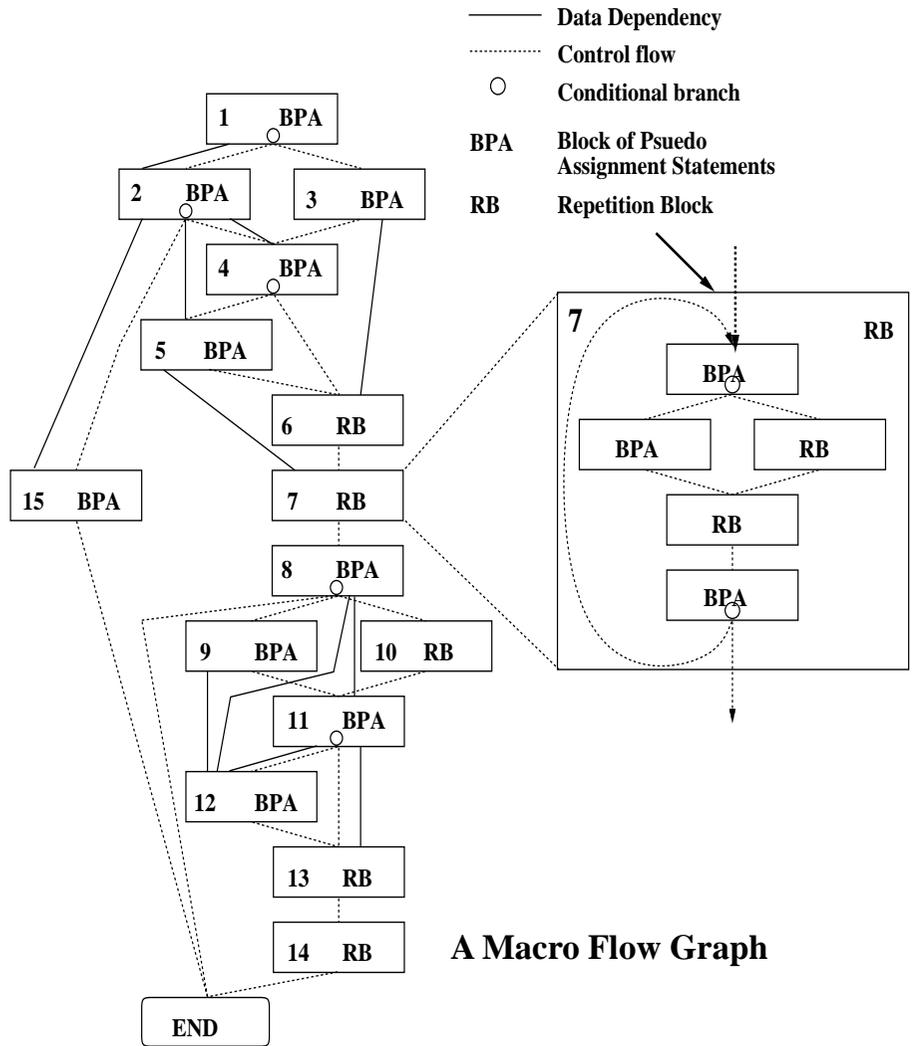
# Generation of coarse grain tasks

## ■ Macro-tasks (MTs)

- **Block of Pseudo Assignments (BPA): Basic Block (BB)**
- **Repetition Block (RB) : natural loop**
- **Subroutine Block (SB): subroutine**

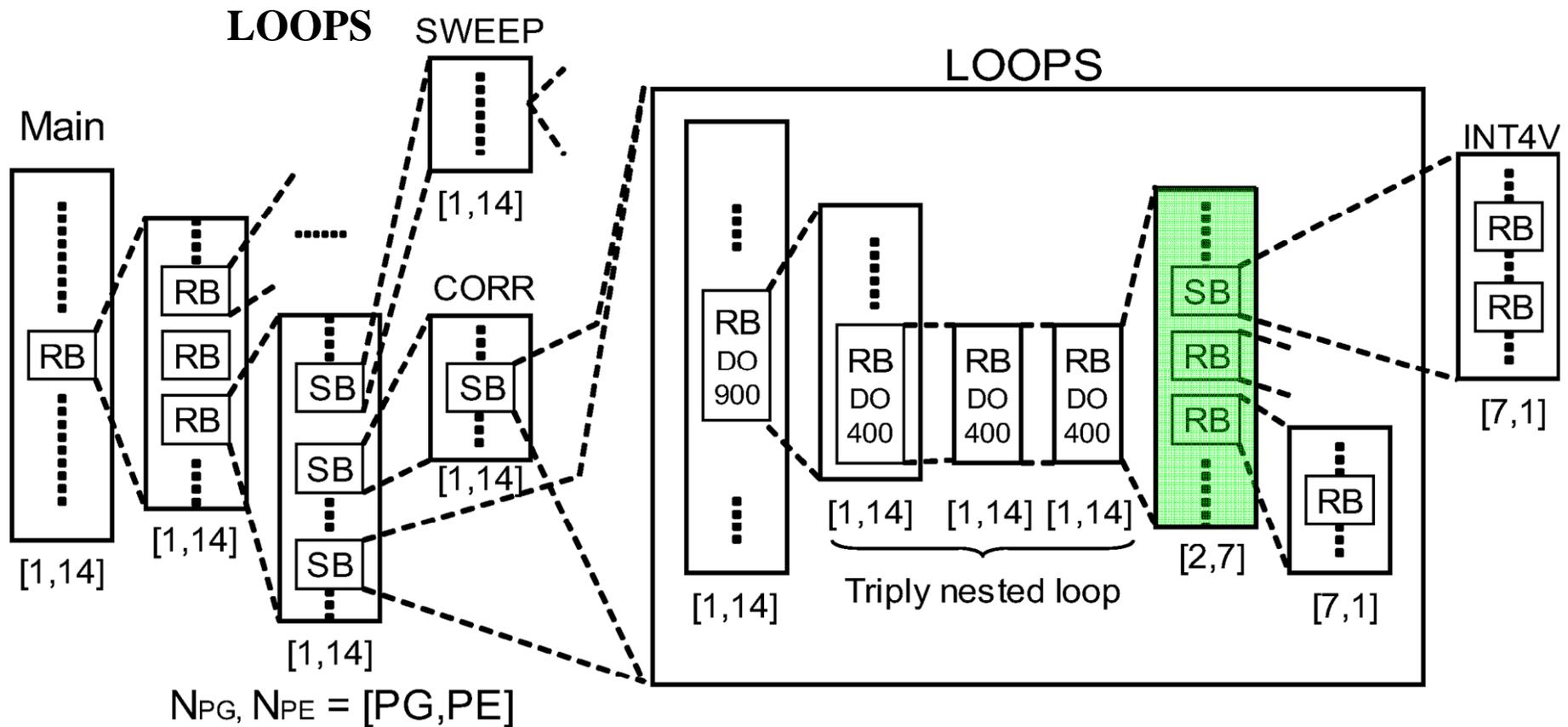


# Earliest Executable Condition Analysis for coarse grain tasks (Macro-tasks)



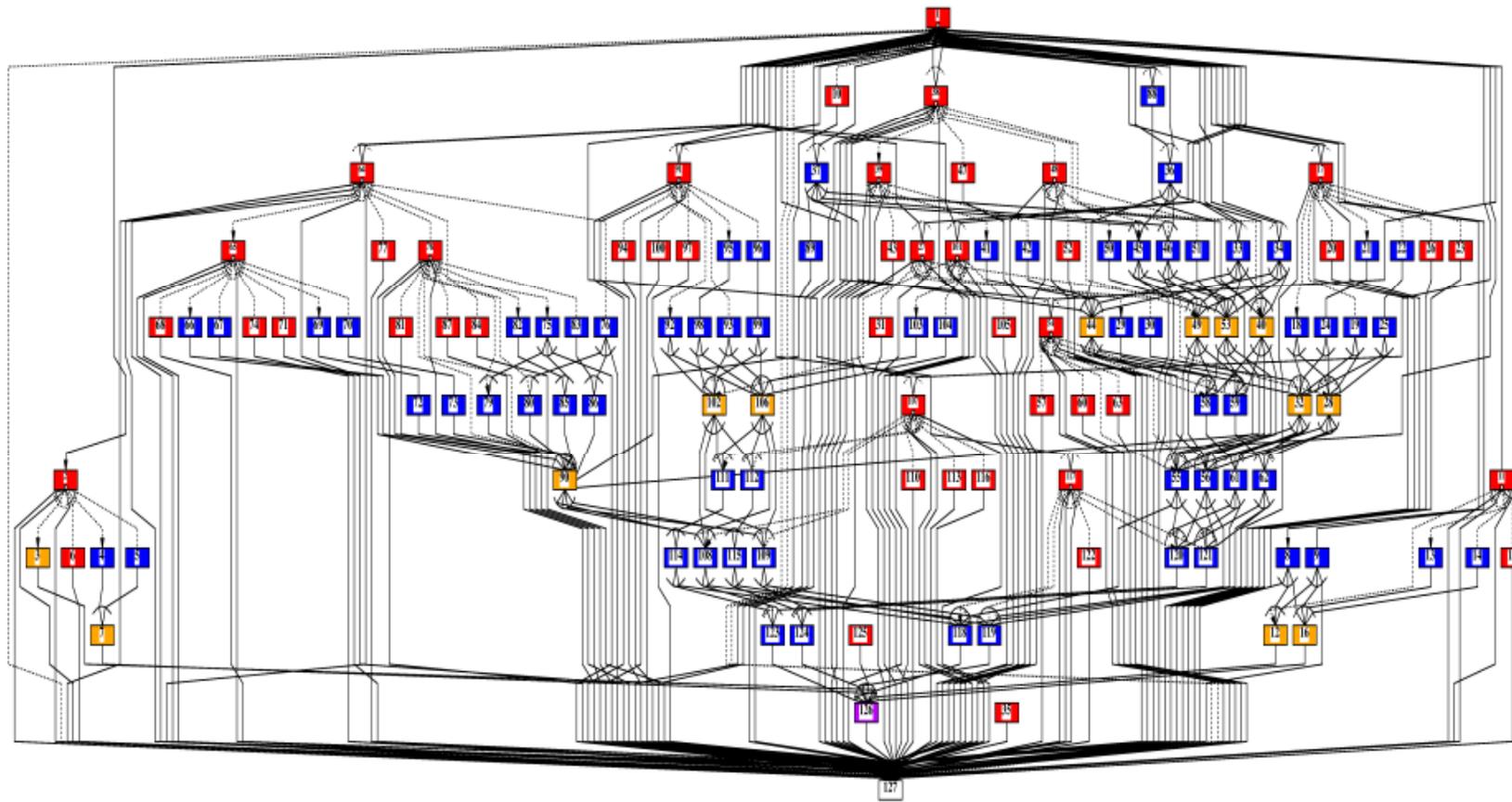
# Automatic processor assignment in su2cor

- Using 14 processors
  - Coarse grain parallelization within DO400 of subroutine



# MTG of Su2cor-LOOPS-DO400

- Coarse grain parallelism  $\text{PARA\_ALD} = 4.3$



DOALL

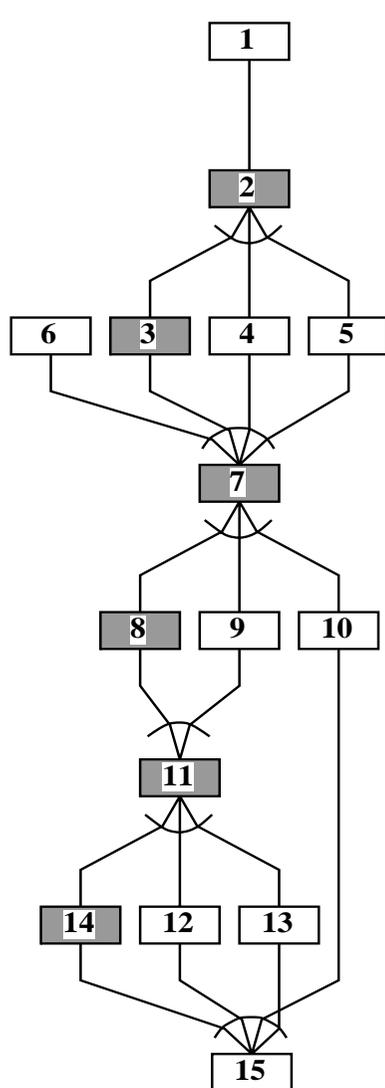
Sequential LOOP

SB

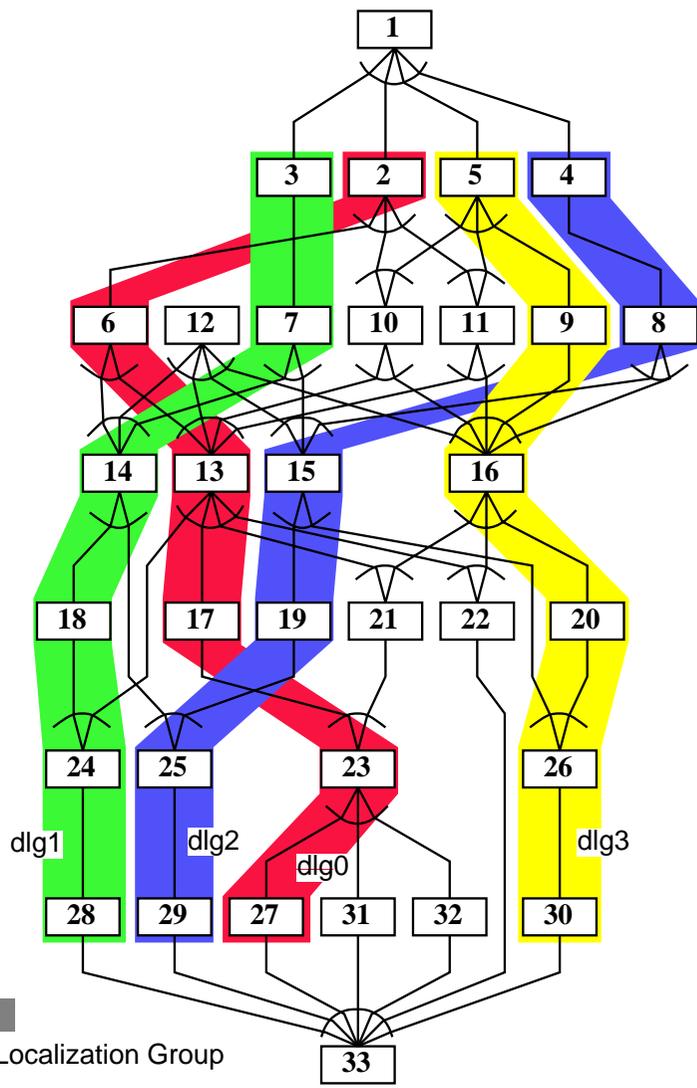
BB



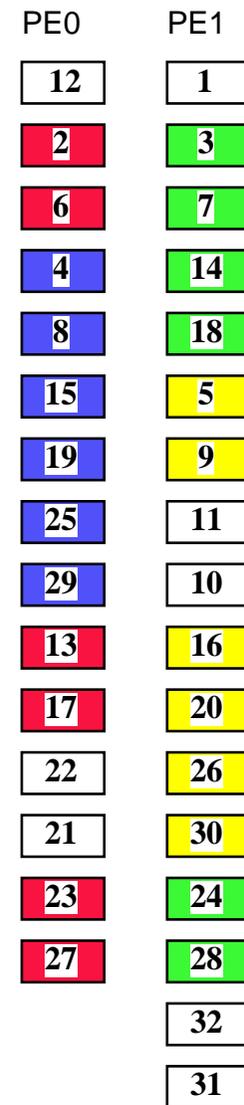
# データローカライゼーションのイメージ



MTG



4分割後のMTG



2プロセッサへの割り当て

## An Example of Data Localization for Spec95 Swim

```

DO 200 J=1,N
DO 200 I=1,M
  UNEW(I+1,J) = UOLD(I+1,J)+
1  TDT8*(Z(I+1,J+1)+Z(I+1,J))*(CV(I+1,J+1)+CV(I,J+1)+CV(I,J)
2  +CV(I+1,J))-TDT8*(H(I+1,J)-H(I,J))
  VNEW(I,J+1) = VOLD(I,J+1)-TDT8*(Z(I+1,J+1)+Z(I,J+1))
1  *(CU(I+1,J+1)+CU(I,J+1)+CU(I,J)+CU(I+1,J))
2  -TDT8*(H(I,J+1)-H(I,J))
  PNEW(I,J) = POLD(I,J)-TDT8*(CU(I+1,J)-CU(I,J))
1  -TDT8*(CV(I,J+1)-CV(I,J))
200 CONTINUE

```

```

DO 210 J=1,N
  UNEW(1,J) = UNEW(M+1,J)
  VNEW(M+1,J+1) = VNEW(1,J+1)
  PNEW(M+1,J) = PNEW(1,J)
210 CONTINUE

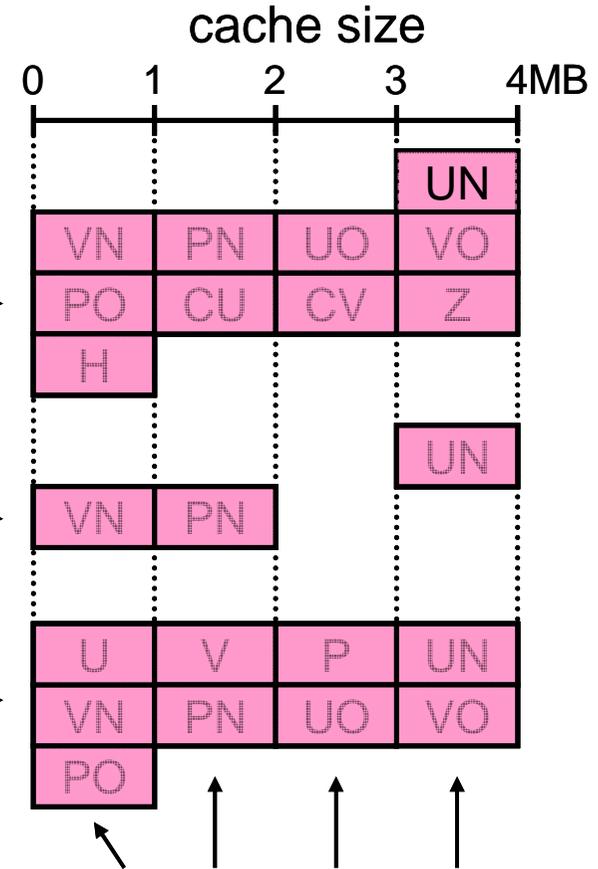
```

```

DO 300 J=1,N
DO 300 I=1,M
  UOLD(I,J) = U(I,J)+ALPHA*(UNEW(I,J)-2.*U(I,J)+UOLD(I,J))
  VOLD(I,J) = V(I,J)+ALPHA*(VNEW(I,J)-2.*V(I,J)+VOLD(I,J))
  POLD(I,J) = P(I,J)+ALPHA*(PNEW(I,J)-2.*P(I,J)+POLD(I,J))
300 CONTINUE

```

(a) An example of target loop group for data localization



Cache line conflicts occurs among arrays which share the same location on cache

(b) Image of alignment of arrays on cache accessed by target loops

# Data Layout for Removing Line Conflict Misses by Array Dimension Padding

## Declaration part of arrays in spec95

before padding

PARAMETER (N1=513, N2=513)

COMMON U(N1,N2), V(N1,N2), P(N1,N2),

\* UNEW(N1,N2), VNEW(N1,N2),

1 PNEW(N1,N2), UOLD(N1,N2),

\* VOLD(N1,N2), POLD(N1,N2),

2 CU(N1,N2), CV(N1,N2),

\* Z(N1,N2), H(N1,N2)

after padding

PARAMETER (N1=513, N2=544)

COMMON U(N1,N2), V(N1,N2), P(N1,N2),

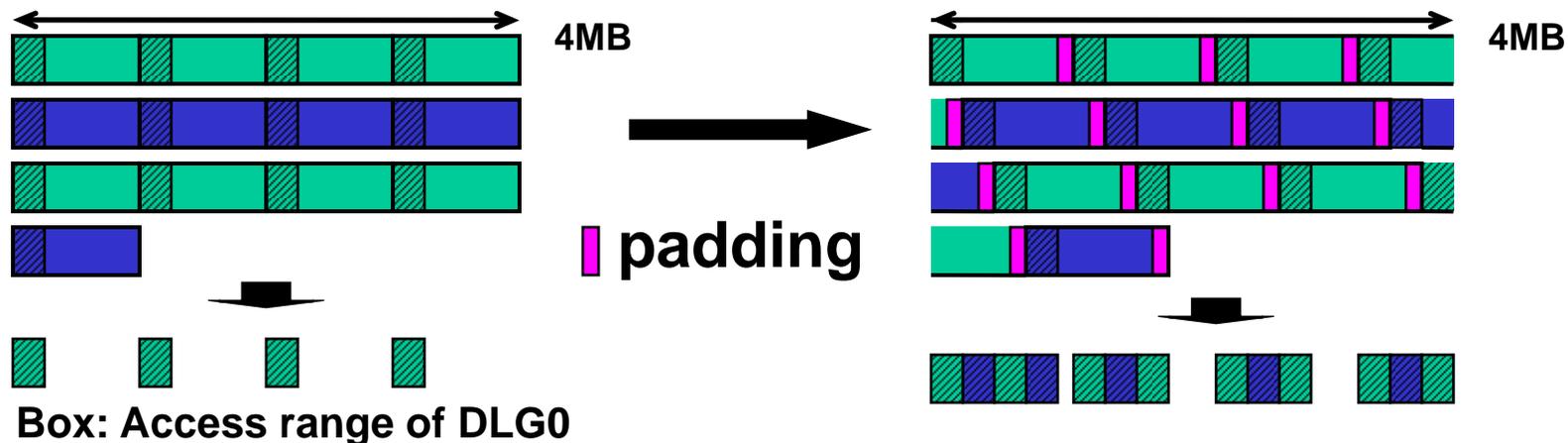
\* UNEW(N1,N2), VNEW(N1,N2),

1 PNEW(N1,N2), UOLD(N1,N2),

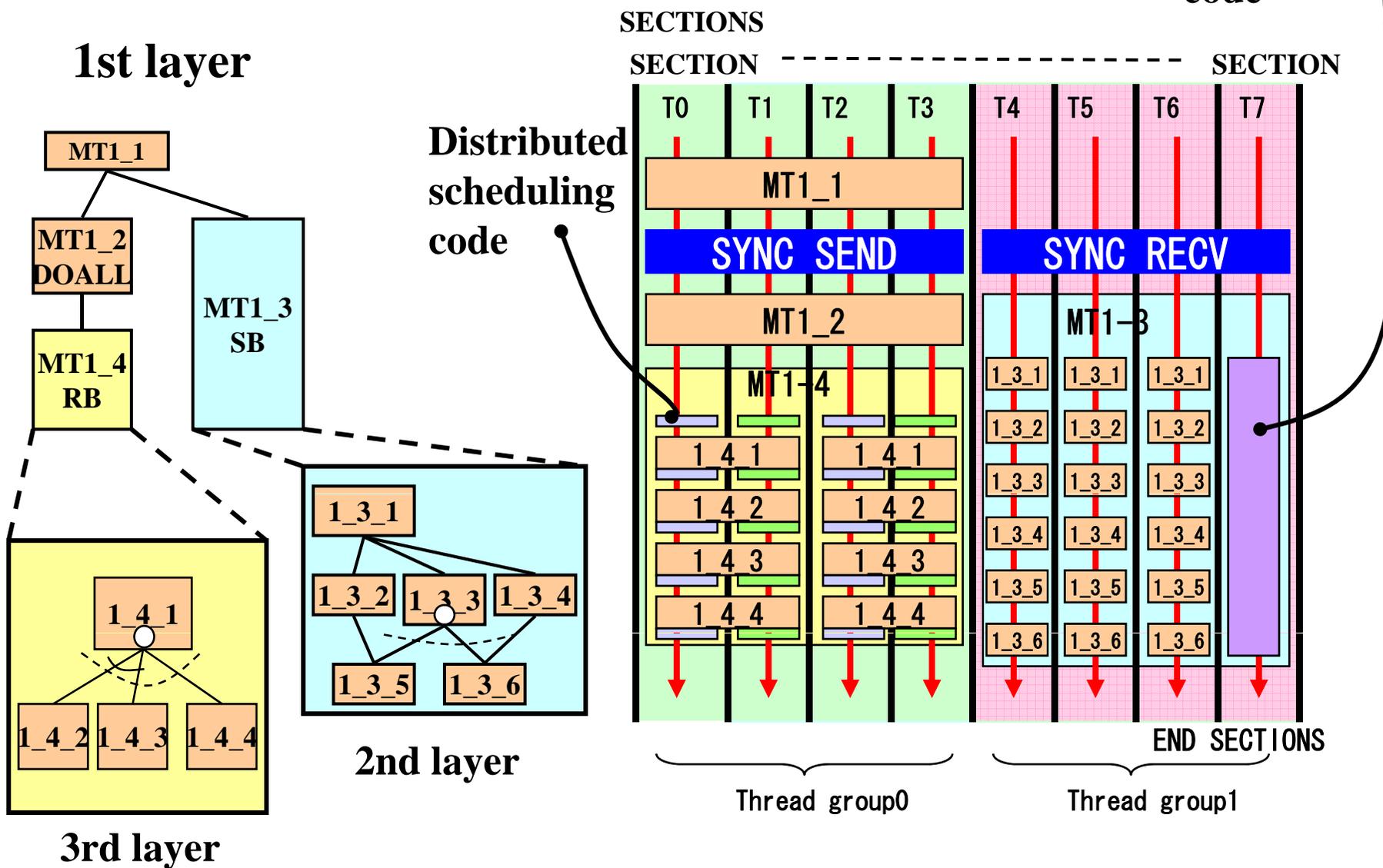
\* VOLD(N1,N2), POLD(N1,N2),

2 CU(N1,N2), CV(N1,N2),

\* Z(N1,N2), H(N1,N2)

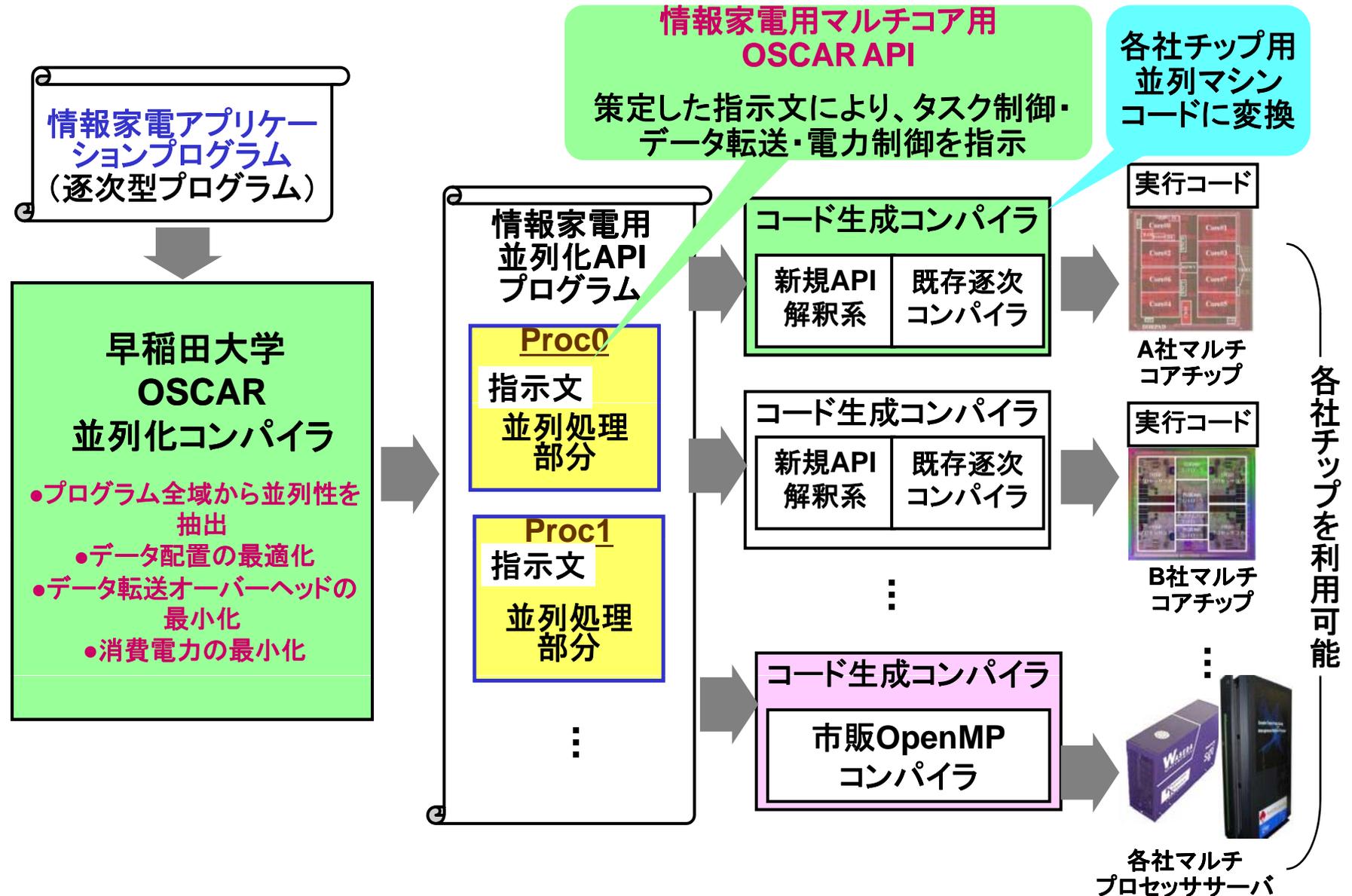


# OSCARコンパイラが自動生成するマルチコアAPI (OpenMP互換)利用、階層マルチグレイン 並列プログラムのイメージ



# OSCAR APIを用いたコンパイル・実行の流れ

API: Application Programming Interface



# 低消費電力リアルタイム並列処理を可能とするAPI

## OSCAR API概要

### <主な特徴>

- ユーザプログラムからの**低消費電力制御**を可能とする指示文
- **リアルタイム並列処理**を可能とするメモリ管理・時間管理用指示文
- プロセッサによる計算実行と並列してメモリからのデータ転送を可能とする**DMA転送指示文**
- 異なる企業のマルチコア間での**プログラム移植が容易**
- 15種の指示文のみに抑えた**コンパクトな規格**で、指示文を理解する小規模ソフトウェアを開発するだけで、既存の逐次コンパイラを用いて並列マシンコードを作成できる。**初期導入コストが小**
- 早稲田**OSCAR並列化コンパイラ**の利用により、逐次プログラムからAPI入り並列化プログラムの自動生成可能。**人手では数ヶ月を要する低消費電力並列化プログラムを数分で自動作成可**
- 新規指示文はプログラム中のコメント文の形でユーザプログラムに挿入されるため、**市販OpenMPコンパイラ**を用い、**マルチコアPC、サーバ上でも実行可能**

# 低消費電力リアルタイム並列処理を可能とするAPI

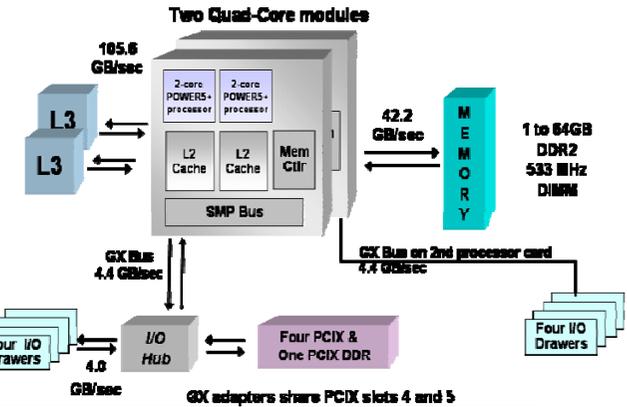
## OSCAR API概要

指示文リスト 詳細は <http://www.kasahara.cs.waseda.ac.jp/index.ja.html> 参照

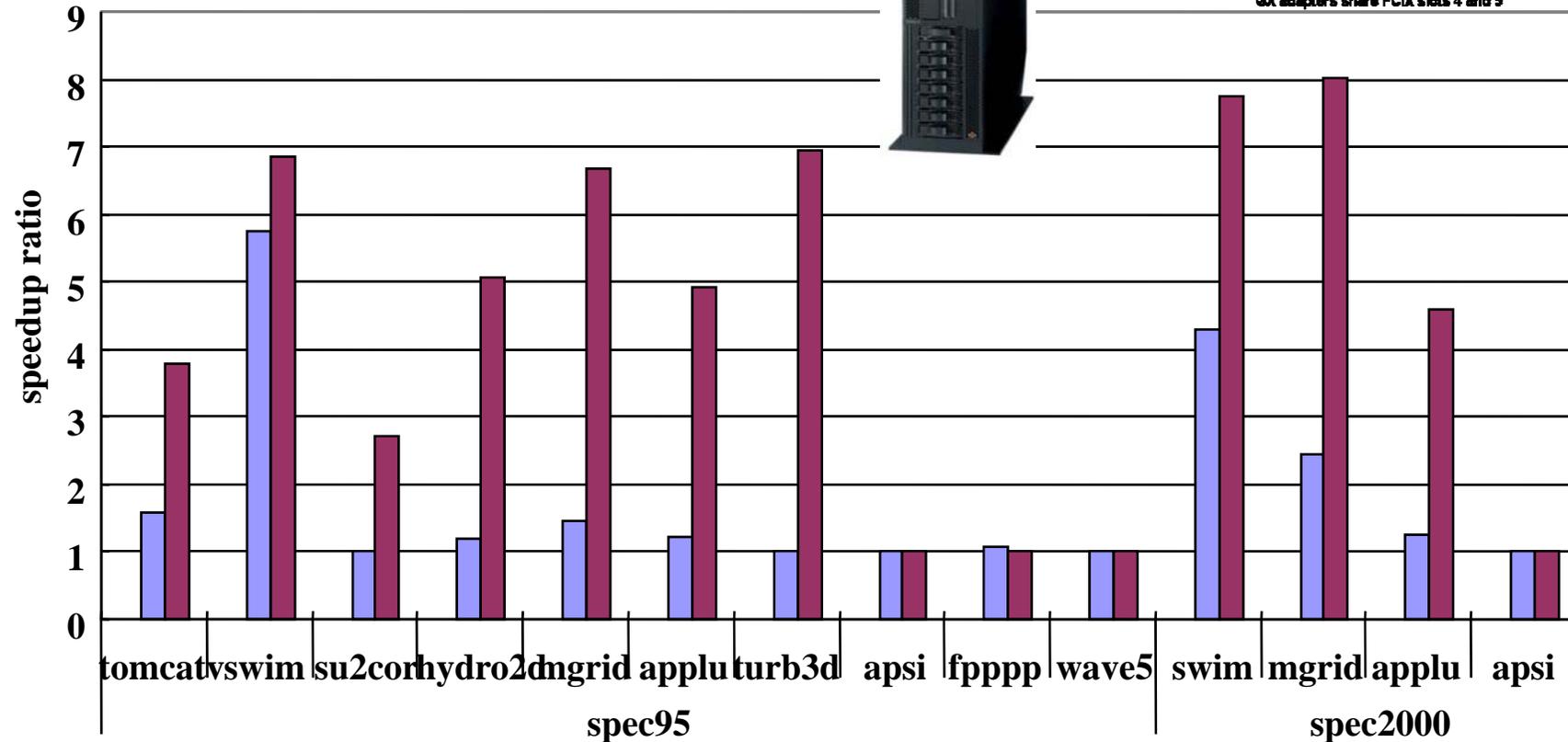
- 共有メモリ並列処理用 OpenMP 指示文 (4 種)
  - 並列スレッドの生成指示文
  - 排他同期制御用クリティカルセクション指示文
  - メモリー貫性制御指示文
  - スレッドプライベート変数指示文
- <新規>組込及びリアルタイム処理用メモリ配置指示文 (3 種)
  - オンチップ集中共有メモリへのデータ配置を指定する指示文
  - ローカルデータメモリにデータを配置する指示文 (OpenMP 指示文の拡張利用)
  - 各プロセッサコア上の分散共有メモリへのデータ配置を指定する指示文
- <新規>組込及び高性能計算用データ転送指示文 (4 種)
  - データ転送コントローラを用いた転送指定する指示文 (詳細指示は下記指示文を用いて指定)
  - 連続したデータ領域の転送を指定する指示文
  - とびとびのデータを転送するストライド転送を指定する指示文
  - データ転送コントローラによる同期フラグセット及びチェックを行う指示文
- <新規>低消費電力制御用指示文 (2 種)
  - CPU 等の各種モジュールの周波数・電圧・電源遮断制御を下記 100 分率で指定する指示文  
100 : 最大周波数で動作、50 : 周波数を 1/2 にスローダウン、0 : クロックオフ等。各動作周波数に対応した電圧レベルの指示可能。-1 : リーク電力を抑える電源遮断。
  - 指定したモジュールの周波数・電源状態を取得する指示文
- <新規>メニーコア対応ネスト並列処理用グループバリア同期指示文 (1 種)
  - 任意の CPU グループに対するバリア同期を指定する指示文
- <新規>リアルタイム処理用 タイマー指示文 (1 種)
  - デッドライン管理のため経過時間を取得するタイマー指示文

# IBMサーバp550q上でのOSCAR並列化コンパイラの性能

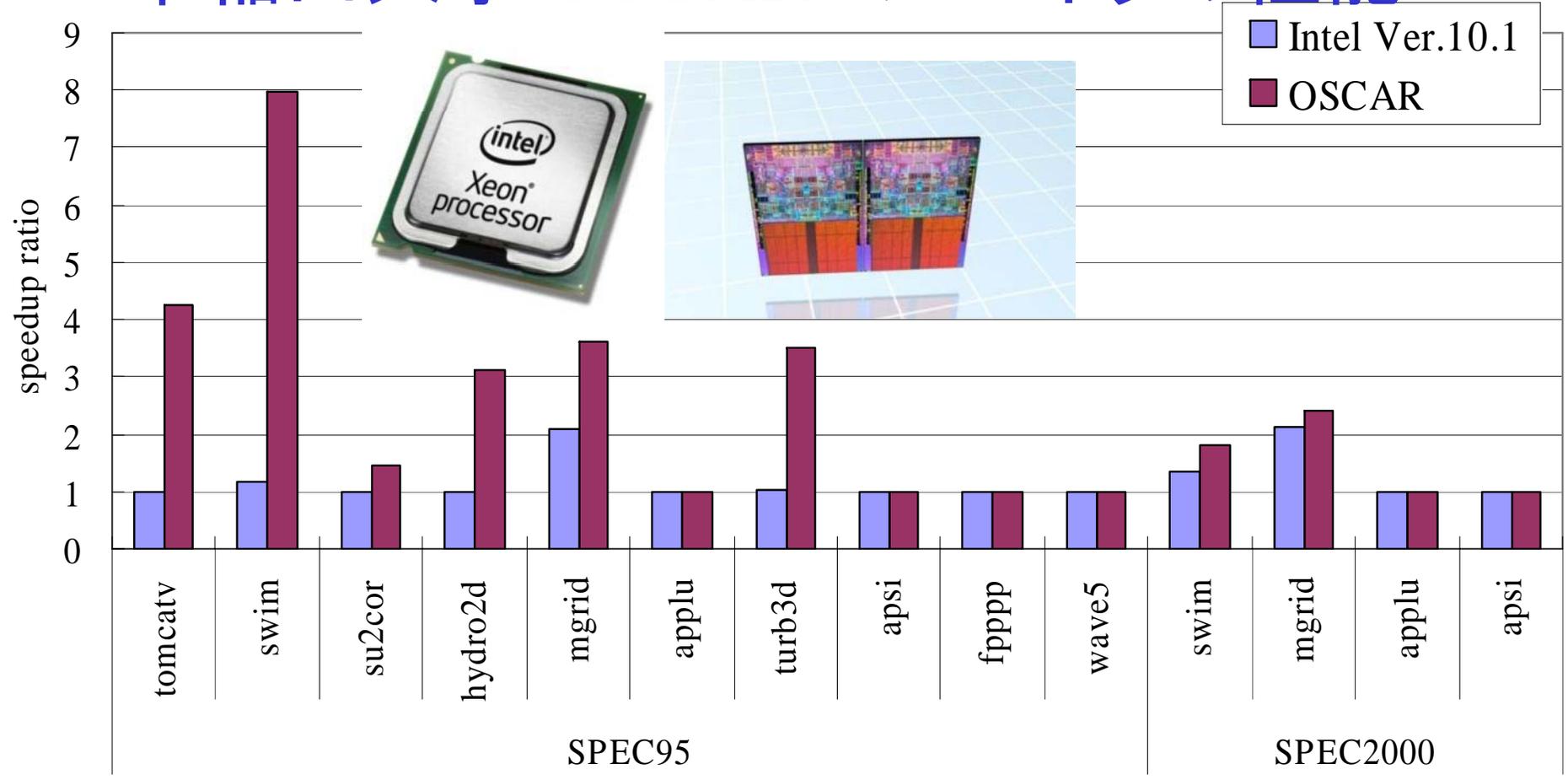
8プロセッサコア・マルチプロセッサシステム上で  
従来のループ並列化に対し、2.7倍の高速化



- ループ並列化
- マルチグレイン並列化

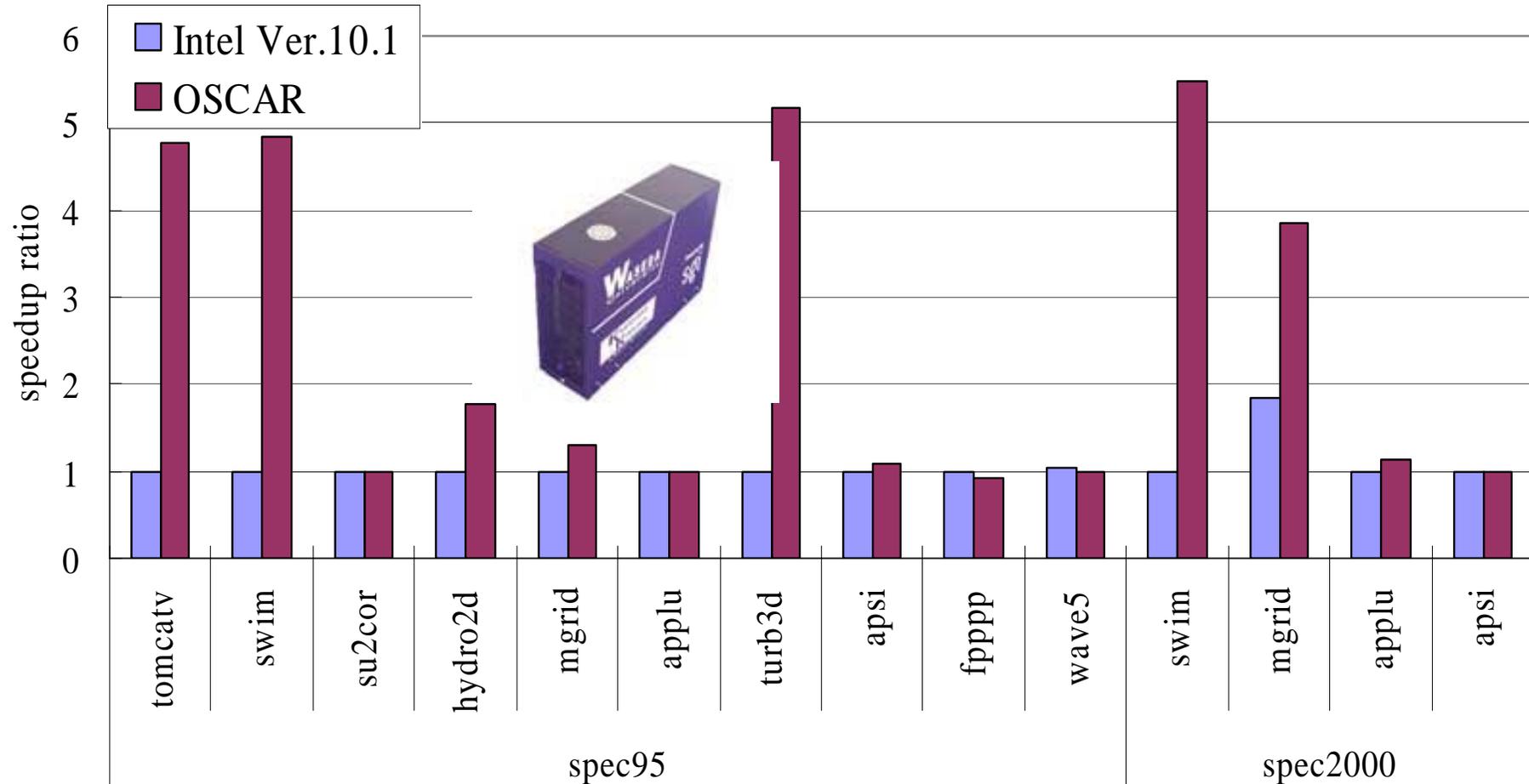


# インテル クアッドコア Xeon プロセッサ上での 早稲田大学 OSCAR コンパイラの性能



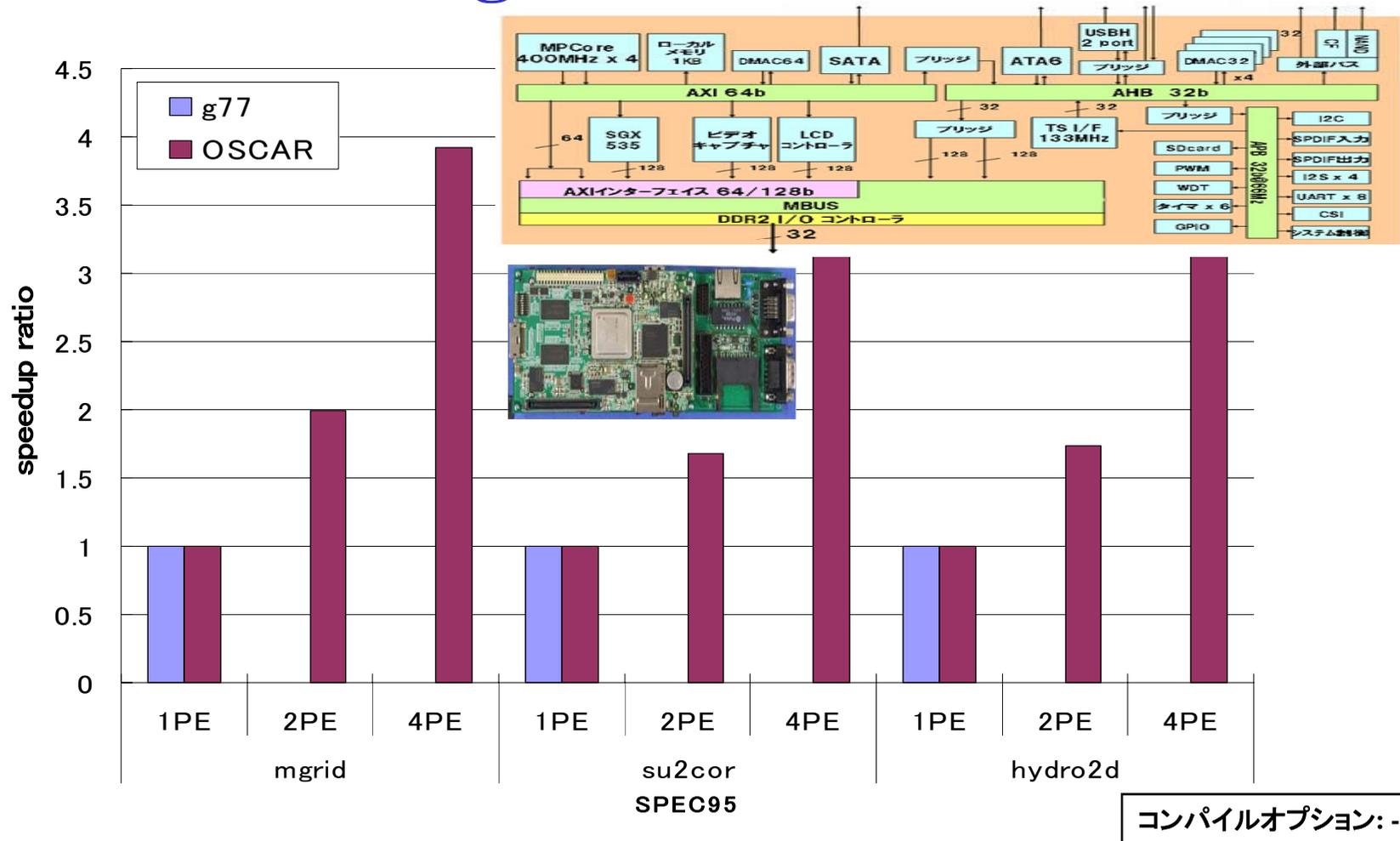
**OSCAR コンパイラが生成するOpenMP並列化コードはインテルコンパイラ ver.10.1の性能をインテル・マルチコア上で2.09 倍向上**

# インテルMontvaleマルチコアを用いた 16 コアSGI Altix 450 デスクサイドサーバ上での OSCAR コンパイラの性能



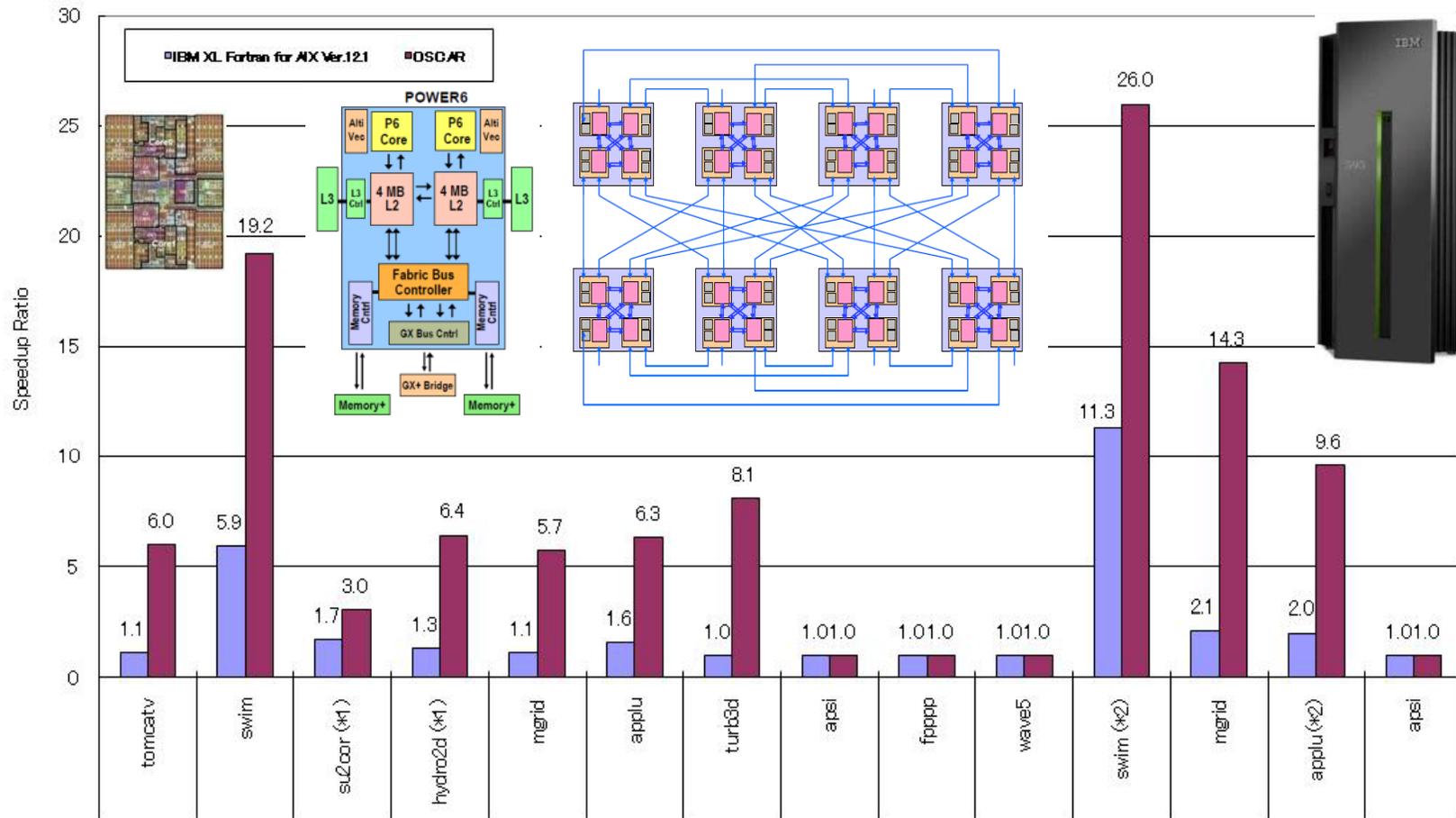
**OSCAR コンパイラが生成するOpenMPコードはインテル  
Itanium Compiler revision 10.1の性能を 2.32 倍向上**

# 早稲田大学 OSCARコンパイラの NEC NaviEngine上での並列処理性能



- OSCAR コンパイラは4コアARM・NECマルチコア上で1コアと比べSpec CFP95 3プログラム平均で3.42倍の速度向上

# Performance of OSCAR Compiler on IBM p6 595 Power6 (4.2GHz) based 32-core SMP Server



**OpenMP codes generated by OSCAR compiler accelerate IBM XL Fortran for AIX Ver.12.1 about **3.3 times** on the average**

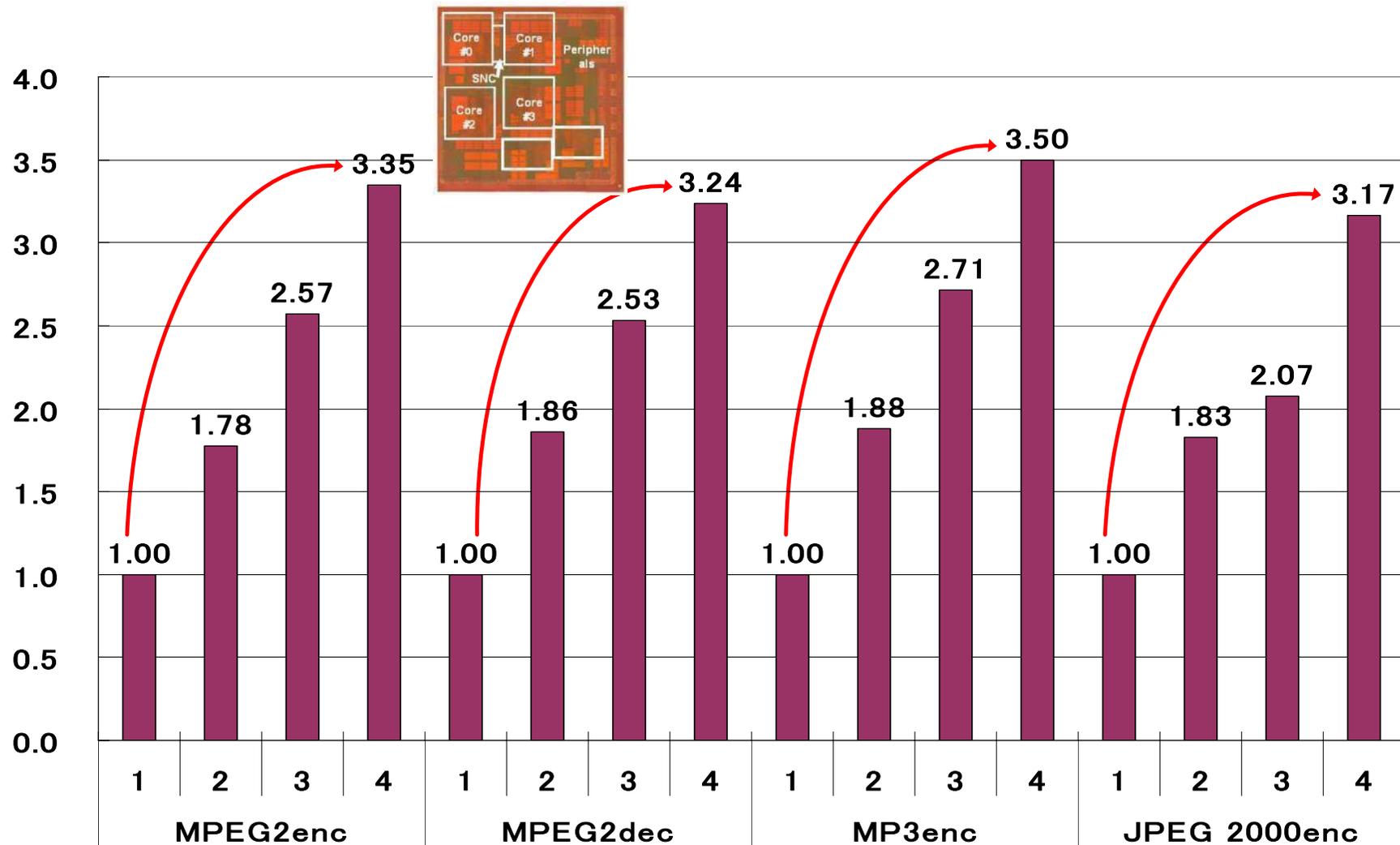
Compile Option:

(\*1) Sequential: -O3 -qarch=pwr6, XLF: -O3 -qarch=pwr6 -qsmp=auto, OSCAR: -O3 -qarch=pwr6 -qsmp=noauto

(\*2) Sequential: -O5 -q64 -qarch=pwr6, XLF: -O5 -q64 -qarch=pwr6 -qsmp=auto, OSCAR: -O5 -q64 -qarch=pwr6 -qsmp=noauto

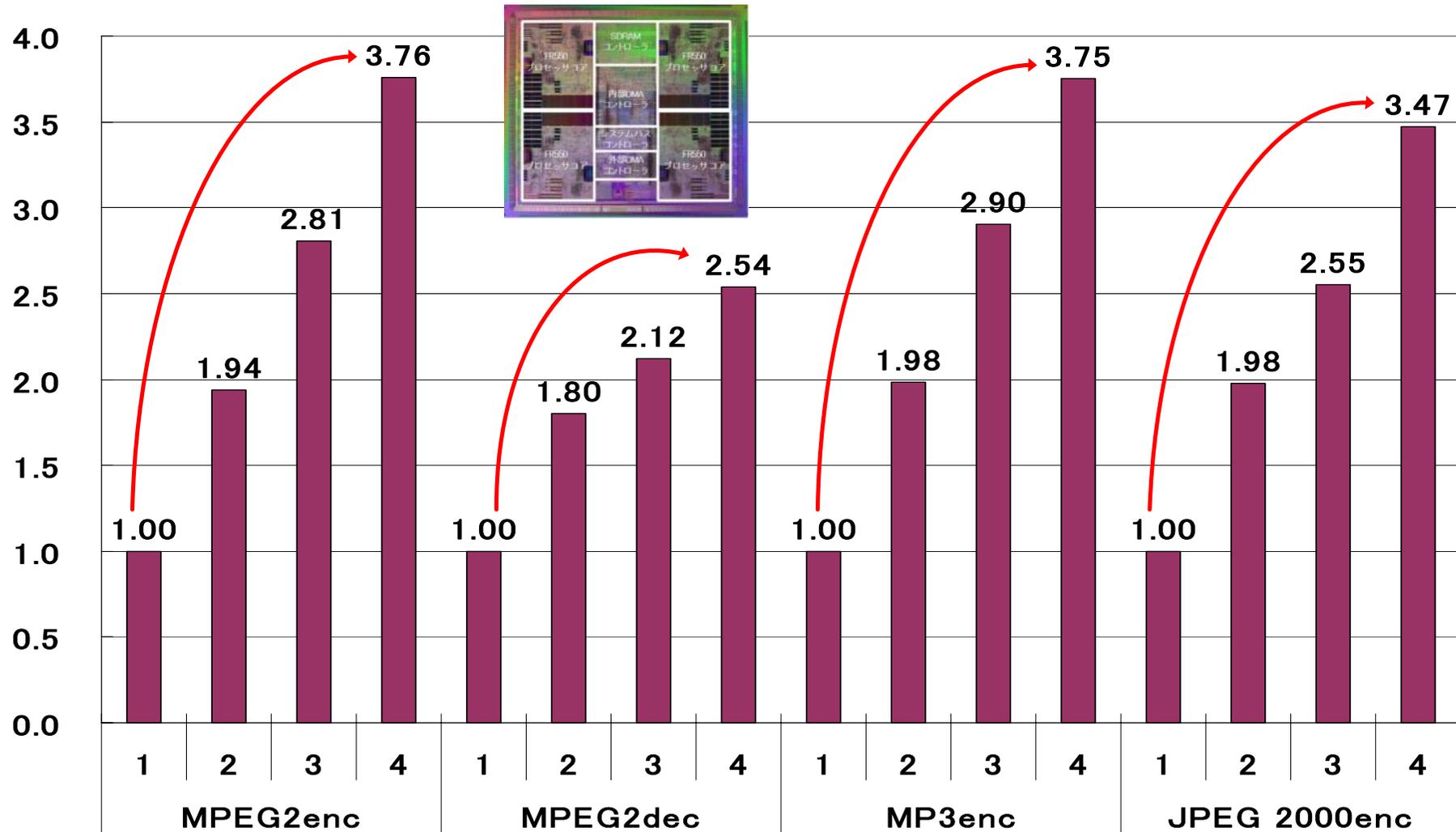
(Others) Sequential: -O5 -qarch=pwr6, XLF: -O5 -qarch=pwr6 -qsmp=auto, OSCAR: -O5 -qarch=pwr6 -qsmp=noauto

# 開発RP1マルチコア(4cores)上での並列化 コンパイラを用いた並列処理性能(速度向上率)



1プロセッサと比較して、4プロセッサで平均3.31倍の速度向上

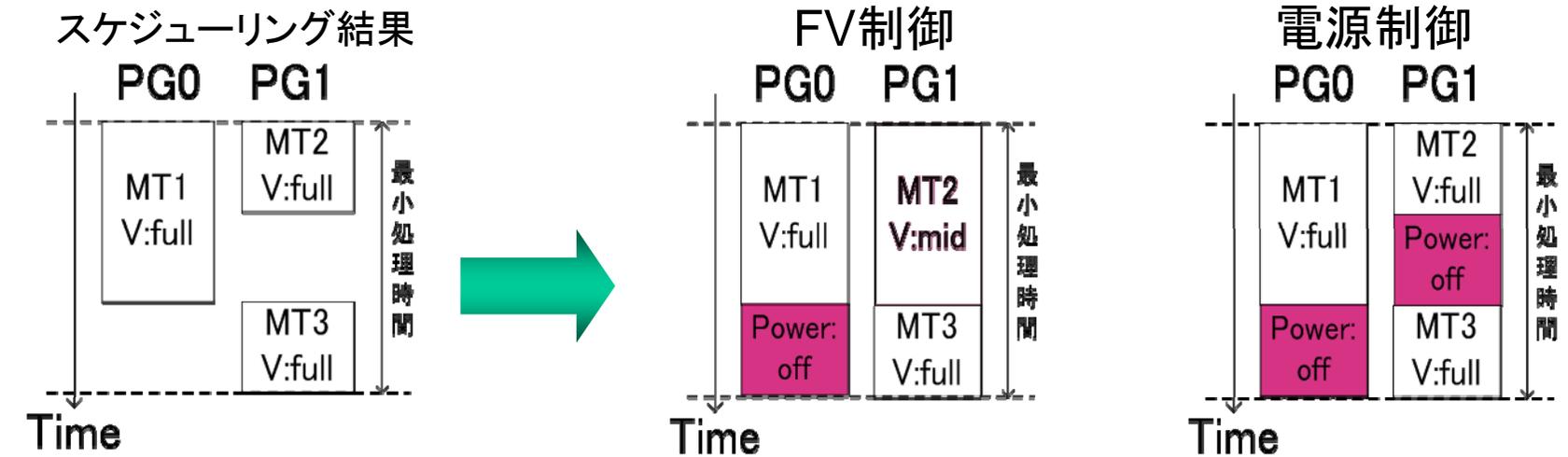
# 既存富士通 FR1000マルチコア上での OSCARコンパイラによる並列化性能(策定API利用)



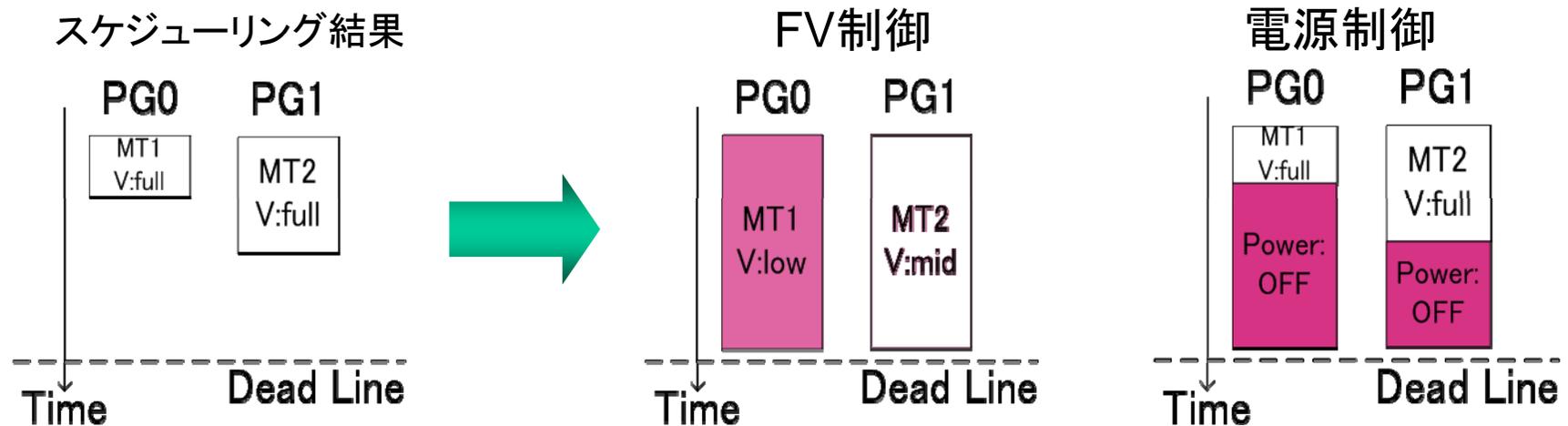
1プロセッサと比較して、4プロセッサで平均3.38倍の速度向上

## 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

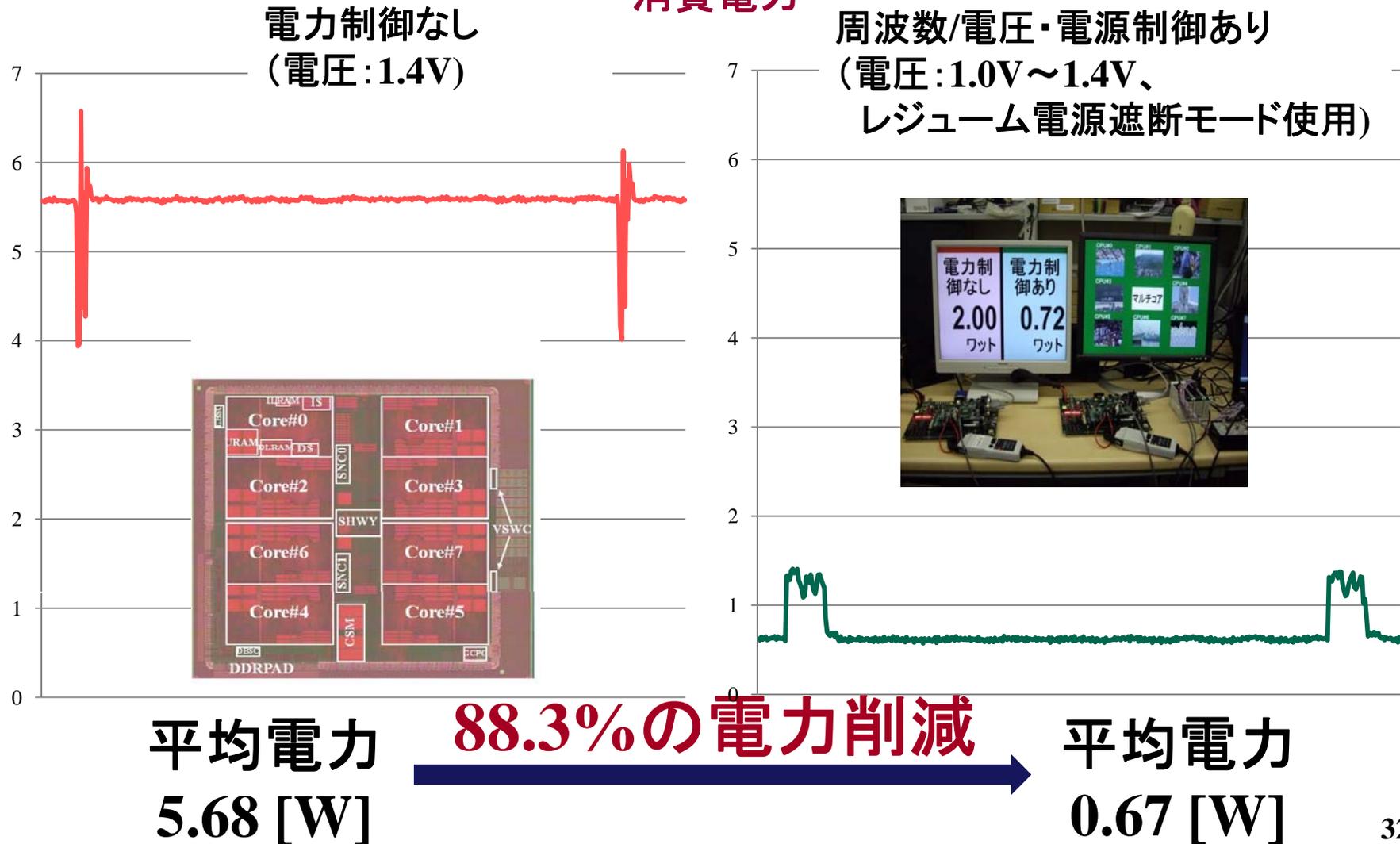


- デッドライン制約を考慮した電源・周波数電圧制御



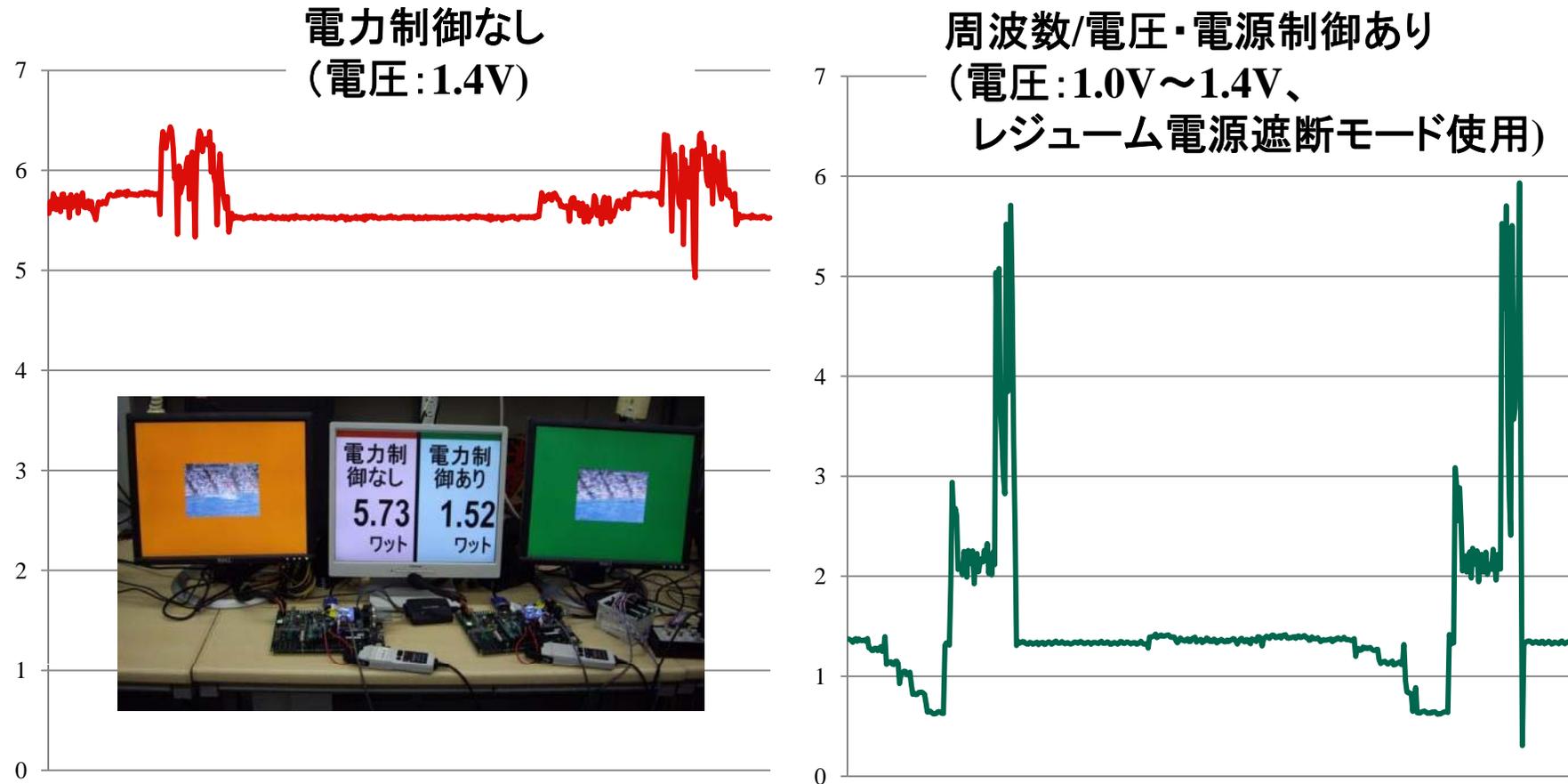
# 音楽圧縮におけるコンパイラ周波数/電圧・電源制御 による開発チップ上での消費電力削減効果

セキュアオーディオ圧縮(AACエンコード+AES暗号化)処理を8コアで実行時の  
消費電力



# 画像表示におけるコンパイラ周波数/電圧・電源制御 による開発チップ上での消費電力削減効果

動画表示(MPEG2デコード処理)を8コアで実行時の消費電力



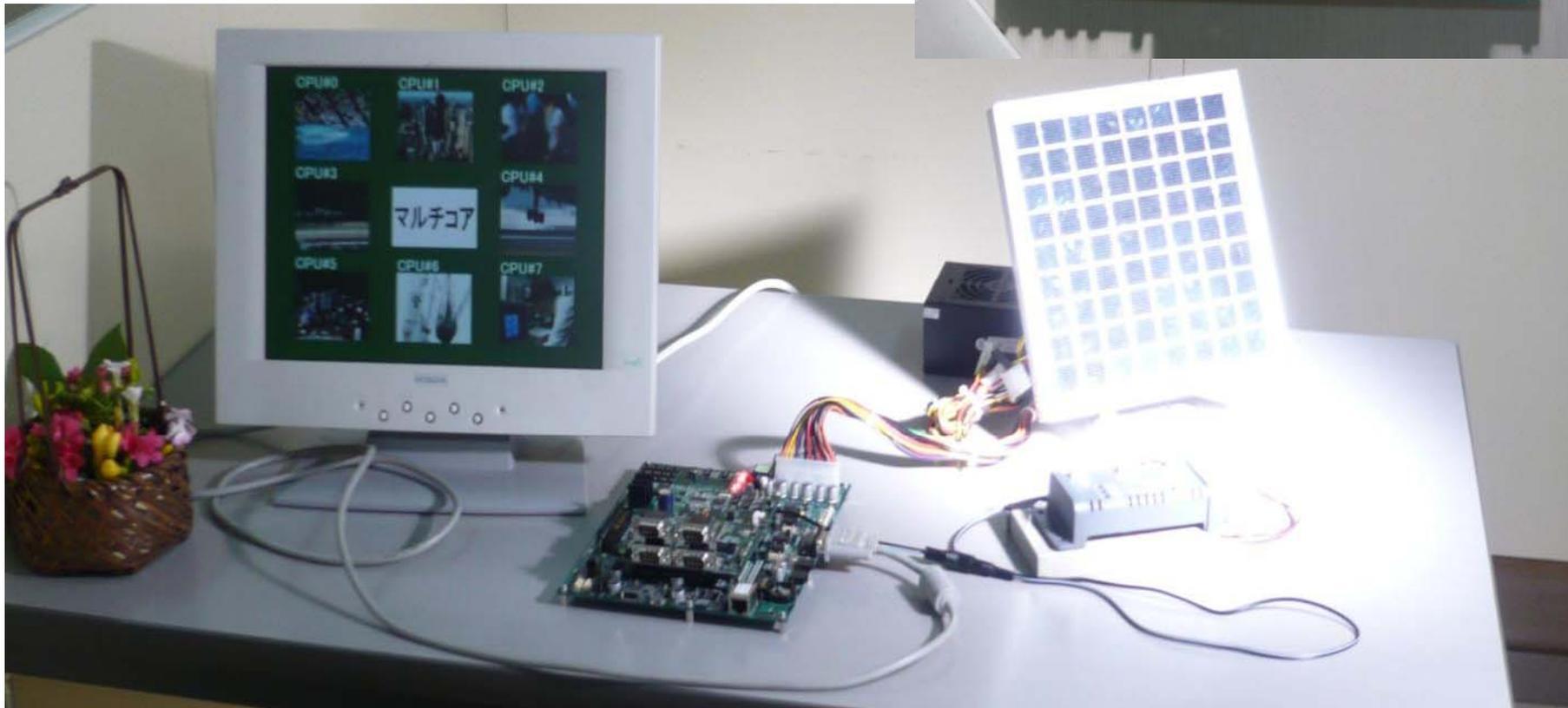
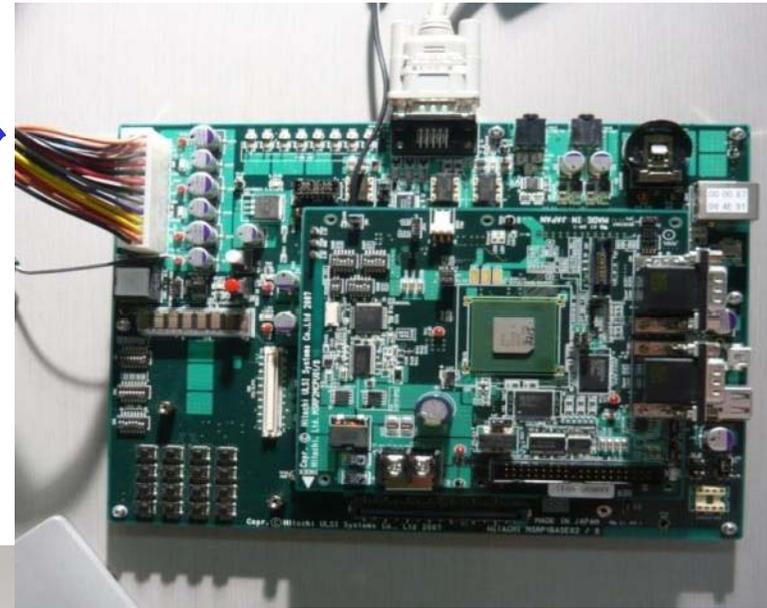
平均電力  
5.73 [W]

73.5%の電力削減

平均電力  
1.52 [W]

# 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)

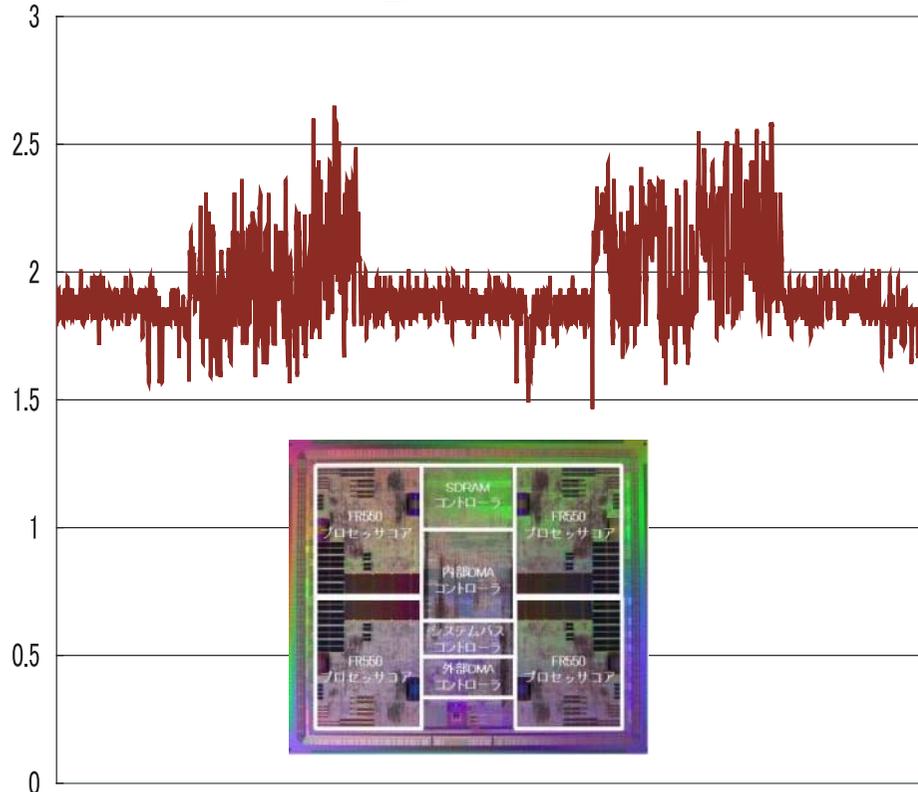
- クリーンエネルギーで駆動可
  - 電力供給が困難な場所での使用可能
  - 災害時でも使用可能



# 画像表示におけるコンパイラ周波数/電圧・電源制御 による既存FR1000(4コア)マルチコア上での消費電力削減効果

動画伸張(MPEG2デコード)処理を4コアで実行時の消費電力

電力制御無し  
(電圧: 1.25V)



周波数制御有り  
(電圧: 1.25V、クロック停止)

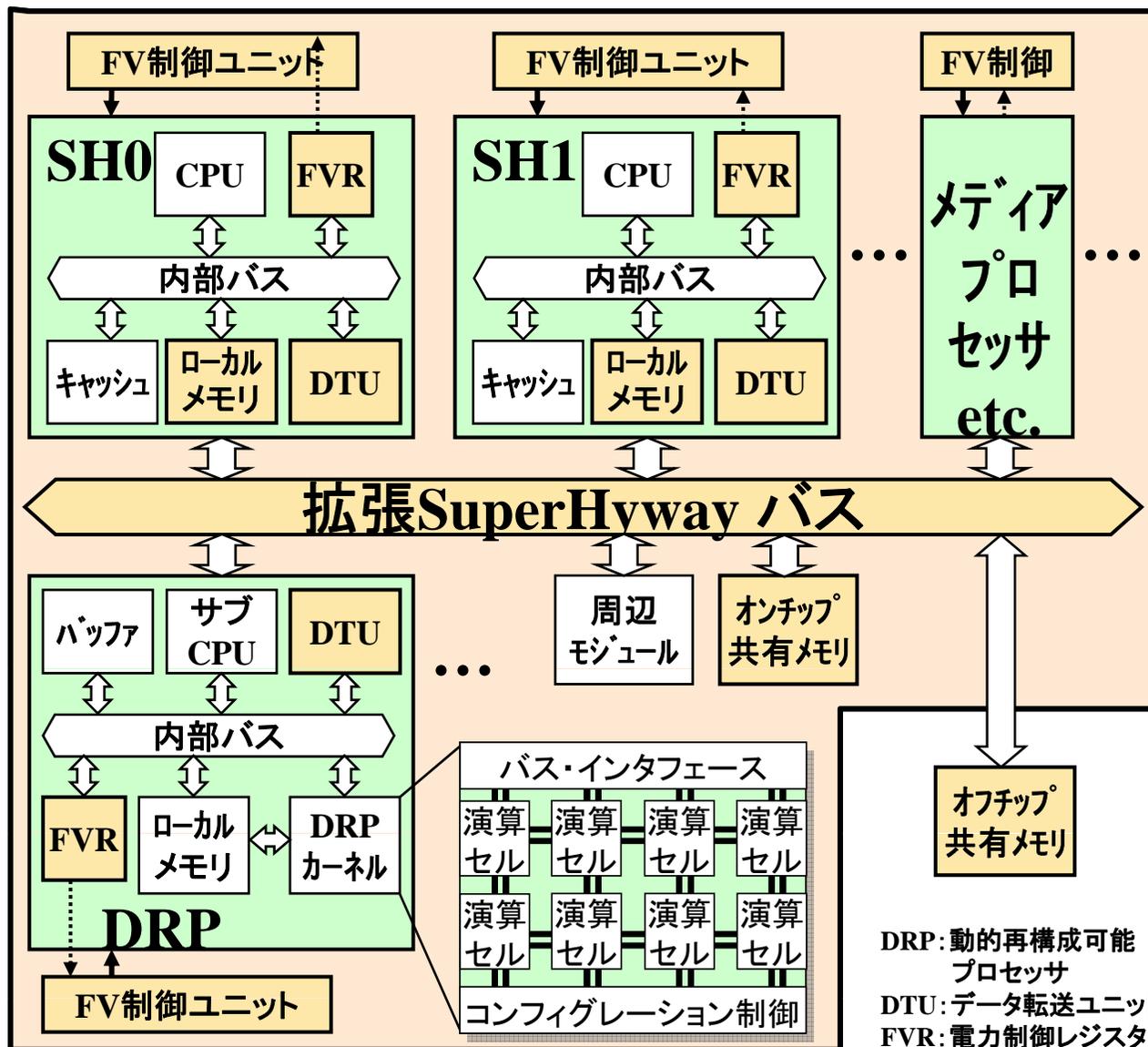


平均電力  
1.93[W]

23%の電力削減

平均電力  
1.48[W]

# OSCARヘテロジニアスマルチコアの例



- 各種専用プロセッサを搭載したヘテロマルチ構成
- 階層的なメモリ構造
- スライド転送、gather/scatter転送、転送リストによる連続データ指示対応データ転送機構
- スプリットランザクシオン対応拡張SuperHywayバス
- 各コアの電力制御(周波数・電圧変更)可能な電力制御レジスタ

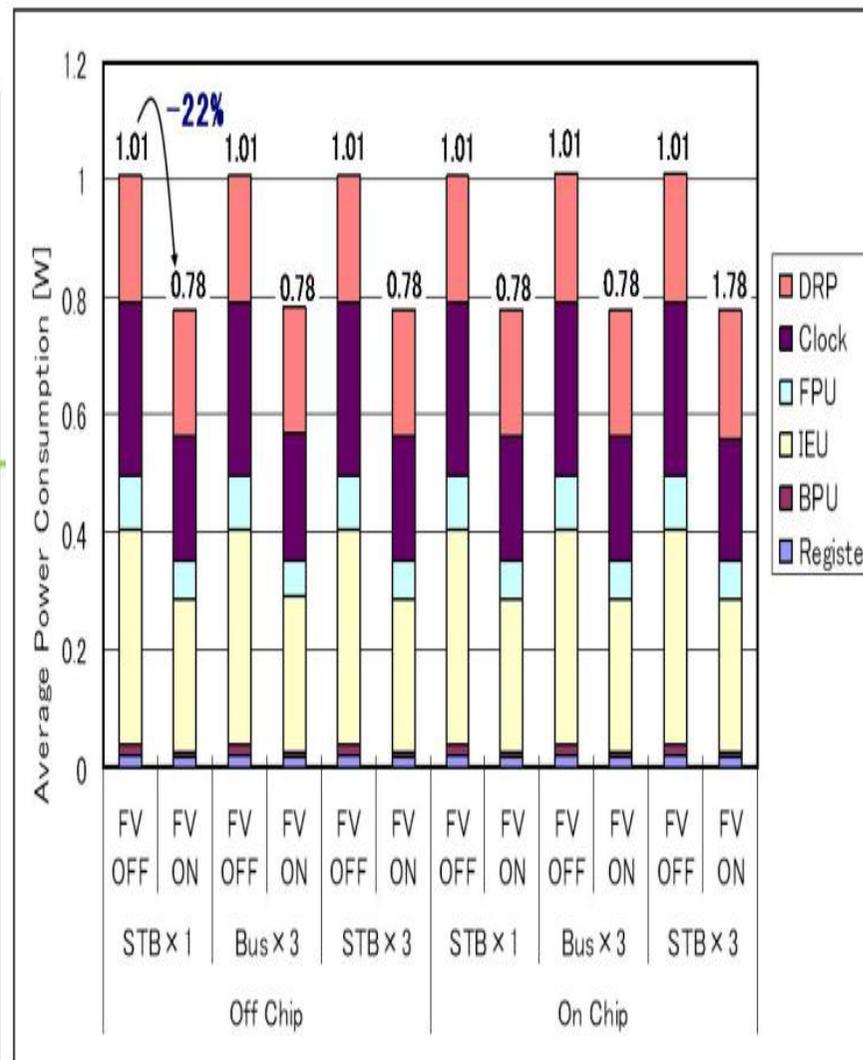
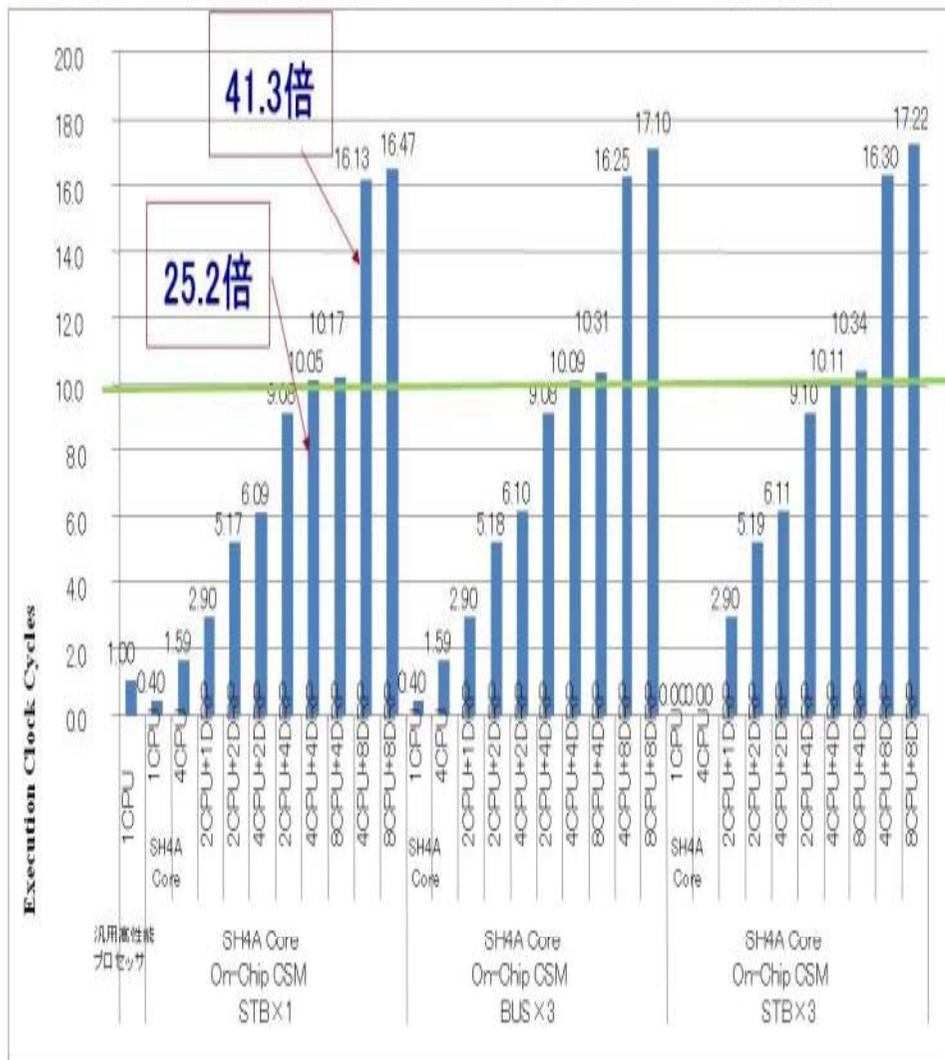
DRP: 動的再構成可能プロセッサ  
 DTU: データ転送ユニット  
 FVR: 電力制御レジスタ



# OSCARヘテロジニアスマルチコアとコンパイラの性能

## ヘテロジニアスマルチコア性能 (オンチップ共有メモリ:4クロック)

■ 汎用コア1台に対し、4汎用コア+4アクセラレータで25.2倍の性能



# まとめ

- 世界初のコンパイラ協調型 高性能・低消費電力・リアルタイム情報家電向け4コア(RP1),8CPUコア(RP2)マルチコアLSIを試作
- 8コアRP2チップでは、8個のプロセッサとメモリの独立電源遮断・動作周波数制御(1/2,1/4,1/8,0)・電圧制御(1.4V,1.2V,1.0V)可能。
  - 総合科学技術会議:8画面までの動画像を表示し、標準半導体と比べ
    - 8画面表示時 1/14に電力削減 マルチコア: 2.5W,標準半導体:35W
    - 1画面表示時1/50に電力削減 マルチコア: 0.5W, 標準半導体:25W
- 世界最高処理性能かつ世界初の電力制御を実現したOSCAR自動並列化コンパイラの開発に成功(動的電力、今後の微細化で問題となるリーク電力も削減)
  - 自動並列化によりAACエンコーダを8プロセッサで5.8倍の高速化
  - IBM(Power6), Intel(SGI Altix450 最新Itanium2 Montvale16コア, Quad-core Xeon)上で各社コンパイラの性能を2倍以上向上
  - 世界初の電力制御に成功し、オーディオAACエンコードで88%、動画像MPEG2エンコードで74%の電力削減:太陽電池にて駆動可能
- 従来の手動並列化では数週間単位の時間を要した並列アプリケーション作成を、各社のマルチコア用にコンパイラによりAPIを用いて数秒単位で作成
- 今後:情報家電・自動車統合制御系・クールサーバ(グリーンIT)・スパコン

# 笠原博徳

参考

## <略歴>

1980年早稲田大学工学部電気工学科卒, 1985年同大学院博士課程了(工博),  
1985年カリフォルニア大学バークレーEECS客員研究員.  
1986年早稲田大学工学部電気電子情報工学科専任講師,1988年助教授,  
1989年—1990年イリノイ大学 Center for Supercomputing R & D客員研究員,  
1997年早稲田大学理工教授, 現在情報理工学科教授、アドバンスマルチコアプロセッサ研究所所長  
1987年IFAC World Congress第1回Young Author Prize,  
1997年情報処理学会坂井記念特別研究賞, 2004年STARC共同研究賞.  
2008年LSIオブザイヤー準グランプリ, Intel Asia Academic Forum Best Research Award

## <主な学会活動>

IEEE: Computer Society (CS)理事, IEEE CS Japan 委員長, IEEE東京支部理事,  
IEEE Japan Council長期戦略委員会委員, IEEE SC(Supercomputing)07 Program Committee等  
情報処理学会: 計算機アーキテクチャ研究会主査, 論文誌編集委HG主査, 会誌編集委HWG主査,  
ACM :International Conference on Supercomputing(ICS)プログラム委員  
ENIAC50周年記念ICS 1996 Program Chair on Software.  
その他スーパーコンピュータ・並列処理に関する多くの国際会議プログラム委員.

## <各種委員等>

経済産業省/NEDO: 情報政策提言フォーラム(アーキテクチャ/HPC WG主査), ビジネスGRID評価委員  
ミレニアムプロジェクトIT21”アドバンス並列化コンパイラ”プロジェクトリーダー, 超先端電子基盤技術委員  
コンピュータ戦略WG委員長, 研究評価委員, “リアルタイム 情報家電用マルチコア “プロジェクトリーダー等  
文部科学省:地球シミュレータ中間評価委員, 次世代スーパーコンピュータ概念設計評価委員  
内閣府:総合科学技術会議分野別推進戦略(報通信分野)ソフトウェアWG,研究開発基盤WG委員,  
第5回産学官連携推進会議分科会パネリスト  
東京電力学術評価委員, 日本EU協調会議科学技術ラウンドテーブル日本代表,  
朝日新聞 ESEC(高校生科学技術チャレンジ) 審査員等。

<論文等> 査読付き論文173, 招待講演80件( 国際会議,国内学会,海外大学,Intel, Google等),  
研究会121件,シンポジウム 26件,メディア掲載 247件( 新聞,TV, 雑誌,Webニュース等), 特許24件