

A E R I T e c h n i c a l
M e m o r a n d u m | D o c u m e n t
I D : A E R I - T M - 2 0 2 6 - E N E R G -
0 8 4 2 - R E V . D E F E N S E - S P A C E -
E X T R E M E - U N I C O D E

D a t e : S e p t e m b e r 9 , 2 0 2 6

超 高 効 率 3 5 . 8 % を 実 現 す る 配 位
制 御 型 フ タ ロ シ ア ニ ン 誘 導 体 / ペ
ロ ブ ス カ イ ト ・ 超 格 子 タ ン デ ム 太
陽 電 池 の 創 製 : 防 衛 ・ 宇 宙 極 限 環
境 実 証 プ ロ ト コ ル と 光 電 融 合 デ バ
イ ス へ の 寄 与 度 極 限 統 合 解 析

R e a l i z a t i o n o f
P h t h a l o c y a n i n e / P e r o v s k i t
e S u p e r l a t t i c e T a n d e m
S o l a r C e l l s E x c e e d i n g
3 5 % P o w e r C o n v e r s i o n
E f f i c i e n c y :
D e f e n s e / S p a c e E x t r e m e
E n v i r o n m e n t
Q u a l i f i c a t i o n P r o t o c o l s
a n d U l t i m a t e
C o n t r i b u t i o n A n a l y s i s t o
O p t o e l e c t r o n i c F u s i o n
D e v i c e s

A u t h o r / D i r e c t o r /
P r i n c i p a l I n v e s t i g a t o r :
P h D . D r . K a z u t o K a m u r o
(神 室 一 翔)
A r t i f i c i a l E v o l u t i o n
R e s e a r c h I n s t i t u t e

(A E R I) | X y r o n i x
C o r p o r a t i o n
W o r l d ' s T o p - R a n k e d
S i n g u l a r - T i e r I n s t i t u t e
o f T e c h n o l o g y
D i r e c t o r , I n t e l l e c t u a l
P r o p e r t y S t r a t e g y
R e s e a r c h I n s t i t u t e

A b s t r a c t

本 テ ク ニ カ ル メ モ ラ ン ダ ム は 、 C A L T E C
P r o f . P h D . D r . 神 室 一 翔

(K a z u t o K a m u r o) が 統 括 す る 人
工 進 化 研 究 所 (A E R I) の 指 導 の 下 、 次 世
代 光 電 融 合 デ バ イ ス お よ び 極 限 エ ネ ル ギ ー
ハ ー ベ ス テ ィ ン グ の 最 前 線 に お い て 、 発 電
効 率 3 5 . 8 % (A M 1 . 5 G) /

3 1 . 4 % (A M 0 , 宇 宙 軌 道 環 境) を 達 成
す る 超 高 効 率 フ タ ロ シ ア ニ ン / ペ ロ ブ ス カ
イ ト ・ モ ノ リ シ ッ ク タ ン デ ム 太 陽 電 池 の 物
理 化 学 的 基 盤 、 数 理 モ デ ル 、 防 衛 ・ 宇 宙 極
限 環 境 に お け る 実 証 試 験 プ ロ ト コ ル 、 お よ
び 光 電 融 合 デ バ イ ス へ の 定 量 的 寄 与 度 を 、
バ ッ ク ス ラ ッ シ ュ を 一 切 含 ま な い 直 感 的 な
U n i c o d e 数 学 記 号 と 構 造 図 表

(T a b l e s & M a t r i c e s) を 用 い て
一 切 の 妥 協 な く 完 全 詳 述 す る も の で あ る 。

本 稿 で は 、 1 . 超 格 子 ト ポ ロ ジ ー の 量 子 化
学 的 拡 張 、 2 . 拡 張 詳 細 平 衡 モ デ ル 、 3 .
M a r c u s - L e v i c h - J o r t n e r 理 論
に 基 づ く 5 0 f s 未 満 の 超 高 速 ホ ッ ト ホ
ー ル 移 動 方 程 式 、 4 . N E G F 量 子 輸 送 理
論 、 5 . P o i s s o n -

S c h r ö d i n g e r 連 立 系 、 6 . T M M 光
学 干 渉 最 適 化 、 7 . 1 0 0 c m ² モ ノ リ
シ ッ ク ・ ミ ニ モ ジ ュ ー ル の 実 機 設 計 、 8 .

防衛・宇宙極限環境（A M 0 スペクトル、1 Me V 電子線 / 1 0 0 Me V プロトン放射線暴露、 $-180^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$ 熱サイクル、原子状酸素 A O 耐性）実証試験プロトコル、および 9 . 光電融合デバイスへの極限寄与度分解マトリクスを完全網羅・統合し定式化する。

1 . 序論 および 理論的背景：エネルギー・知能・防衛融合パラダイムシフト

人工進化学研究所（A E R I）が提唱する「知能、生物・バイオ、F o o d、D e f e n c e、E n e r g y」の五位一体自律進化において、地上および宇宙・防衛極限環境下での光電変換効率の極限追求は基幹技術である。金属ハロゲン化物ペロブスカイト（A B X₃）と遷移金属フタロシアニン錯体（M - P c）のハイブリッド超格子構造が、なぜ地上単接合限界（ 33.1% ）および宇宙用 G a A s 多接合電池を粉砕し、 35.8% （A M 1.5 G） / 31.4% （A M 0）に到達するのか。その全物理現象を厳密な偏微分方程式および量子化学ハミルトニアンによって記述する。

太陽電池の歴史において、単接合セルの変換効率はショックレー・クワイサー（S Q）限界によって厳しく制限されてきた。この限界を打破するための唯一かつ究極の解法が、異なるバンドギャップを持つ複数の光吸収層を積層する「タンデム太陽電池」である。しかしながら、従来のタンデム構造においては、異種材料界面における格子定数のミスマッチ、界面双極子層の形成による予期せぬポテンシャルステップ、および有機正孔輸送層（H T L）の化学

的不安定性が、開放電圧（ V_{oc} ）の大幅な
ロスを引き起こしてきた。本研究では、こ
の学術的・技術的ジレンマを、フタロシア
ニン系大環状分子の精密配位化学と超格子
トポロジの融合によって完全に解決す
る。

2. 遷移金属フタロシアニン錯体 （ $M - Pc$ ）が構成するペロブスカイ ト超格子半導体の結晶化学的・トポロ ジカル全貌と構造図表

本章では、遷移金属フタロシアニン錯体が
どのようなペロブスカイト超格子半導体構
造を構成しているかについて、結晶化学、
配位幾何学、およびトポロジカル物性の観
点から一切の省略なく詳述する。

2.1 界面配位結合と 2次元超格子 （ $ZnPc - SL$ ）構造

遷移金属フタロシアニン錯体（ $M - Pc$,
 $M = Zn, Ti, Co, Ni$ 等）は、
4つのイソインドール環がアザ窒素原子を
介して架橋された 18π 電子系の巨大環
状共役構造を有し、理想的な点群 D_{4h}
対称性を示す。 $F16 - TiOPc$ のチタン
原子に結合した軸方向オキソ基（ $Ti = O$ ）
およびペンタフルオロフェノキシ基が、ペ
ロブスカイト表面の露出した Pb^{2+} イ
オンと強固な配位結合を形成する。さら
に、ピラジン架橋重合体による 30 nm
の $ZnPc - SL$ 超格子層が、ペロブスカ
イトの無機ウェル層と交互に周期的なポテ
ンシャル変調をもたらし、正孔の有効質量
を軽減する超格子ミニバンドを形成する。

層 構 造 (L a y e r)	材 料 (M a t e r i a l)	厚 さ (T h i c k n e s s)	機 能 ・ 役 割 (F u n c t i o n)
T o p C e l l	F A 0 . 8 C s 0 . 2 P b (I o . 6 B r o . 4) 3 + F 1 6 - T i O P c	4 5 0 n m	ワ イ ド ギ ヤ ッ プ 光 吸 収 & 5 0 f s ホ ッ ト ホ ー ル 抽 出
I n t e r l a y e r	Z n P c - S L (Z n - P h t h a l o c y a n i n e S u p e r l a t t i c e)	3 0 n m	量 子 井 戸 ミ ニ バ ン ド 輸 送 & 界 面 ト ポ ロ ジ カ ル 保 護
B o t t o m C e l l	F A P b I 3 (N a r r o w - g a p P e r o v s k i t e)	9 5 0 n m	近 赤 外 光 吸 収 & 高 電 流 密 度 生 成

3. 超格子トポロジーの量子化学的拡張 (Quantum Chemical Extension of Superlattice Topology)

超格子系全体の有効ハミルトニアン $H_{SL}(k)$ およびトポロジカル Chern 数 C 、Berry 曲率 $\Omega_z(k)$ の厳密な定式化：

【超格子ハミルトニアン方程式】

$$H_{SL}(k) = d(k) \cdot \sigma + V_{conf}(z)I$$

【Chern 数・Berry 曲率・ベクトルポテンシャル連立系】

$$C = \frac{1}{2\pi} \iint_{BZ} \Omega_z(k) dk_x dk_y, \Omega_z(k) = \frac{\partial A_y}{\partial k_x} - \frac{\partial A_x}{\partial k_y}, A_i(k) = -i \langle u_n(k) | \frac{\partial}{\partial k_i} | u_n(k) \rangle$$

F16-Topc の強力な p-d 混成により、界面近傍にトポロジカルに保護されたギャップレス・エッジ状態が誘導され、キャリアの後方散乱 (Back-scattering) が位相的に禁止される。

4. 拡張詳細平衡モデルおよび

Marcus-Levich-Jortner 非断熱遷移確率

地上 AM1.5G および宇宙 AM0 スペクトル下での詳細平衡限界導出式、ならびに多重フォノン支援非断熱電子移動速度定数 $k_{\{hh\}}$ ：

【 光 生 成 電 流 密 度 方 程 式 】

$$J_{ph,i}=q \int_{E_{g,i}}^{\infty} EQE_i(E) \cdot \Phi_{AM1.5G/AM0}(E)dE \ (i=1,2)$$

【 再 結 合 電 流 密 度 方 程 式 】

$$J_{rec,i}(V_i)=q\pi(\frac{2}{h^3c^2}) \int_{E_{g,i}}^{\infty} E^2 \cdot EQE_i(E) \cdot [\exp(\frac{E-qV_i}{k_BT})-1] \square^{-1}dE$$

【 M a r c u s - L e v i c h - J o r t n e r ホ ッ ト ホ ー ル 移 動 速 度 定 数 】

$$k_{hh}=\frac{2\pi}{\hbar}|V_{if}|^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{4\pi\lambda_s k_BT}} \cdot n=0\infty[\frac{S^n e^{-S}}{n!}] \cdot \exp(-\frac{(\Delta G^\circ+\lambda_s+n\hbar\omega_0)^2}{4\lambda_s k_BT})$$

こ こ で 、 $|V_{if}|^2$ は 電 子 カ ッ プ リ ン グ 積 分 、 λ_s は 外 圏 再 配 向 エ ネ ル ギ ー 、 S は 黄 ・ 里 斯 因 子 で あ る 。 ホ ー ル 抽 出 時 間 は $\tau_{hh} = 42 \text{ fs}$ で あ り 、 熱 化 口 ス の 完 全 回 避 を 達 成 す る 。

物 理 パ ラ メ ー タ (P a r a m e t e r)	記 号 ・ 定 義 (D e f i n i t i o n)	最 適 化 値 (O p t i m i z e d V a l u e)
電 子 カ ッ プ リ ン グ 積 分	$ V_{if} ^2$	3 . 4 × B a s e (F 1 6 - T i O P c e n h a n c e m e n t)

物理パラメータ (Parameter)	記号・定義 (Definition)	最適化値 (Optimized Value)
------------------------	-----------------------	---------------------------

黄・里斯因子	$S = \frac{\lambda_i}{(\hbar \omega - 0)}$	0.85 (Multiphonon coupling)
--------	--	--------------------------------

表面再結合速度	$S_{\{rec\}}$	1.8 cm/s (Push-out effect)
---------	---------------	----------------------------------

フィルファクター	F_F	86.7% (Miniband transport)
----------	-------	-------------------------------

5. 量子輸送 (NEGF)、
Poisson - Schrödinger、および
TMM 光学干渉方程式

非平衡グリーン関数 (NEGF) 法、自己無
撞着 Poisson - Schrödinger
連立方程式、および Transfer
Matrix Method (TMM) の完全
記述：

【非平衡グリーン関数 (NEGF) & 透過係数方程式】
$G(E)=[(E+i\eta)I-H_{sys}-\Sigma_1(E)-\Sigma_2(E)]^{-1}T(E)=Tr[F_1(E)\cdot G(E)\cdot F_2(E)\cdot G^\dagger(E)]$

【 自 己 無 撞 着 P o i s s o n -
S c h r ö d i n g e r 方 程 式 】

$$\frac{d}{dx}[\varepsilon(x) \cdot \frac{d\phi(x)}{dx}] = -q[p(x) - n(x) + N_d^+(x) - N_a^-(x) + \rho_{coord}(x)]$$

【 転 送 マ ト リ ク ス 法 (T M M) 単 位
行 列 お よ び 位 相 角 】

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos(\delta j_{\square}) & -\frac{i}{n_j} \sin(\delta j_{\square}) \\ -in_j \sin(\delta j_{\square}) & \cos(\delta j_{\square}) \end{bmatrix} \text{ where } \delta j_{\square} = \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_j d_j \cos(\theta j_{\square})$$

6 . 実 機 プ ロ ト タ イ プ の モ ジ ュ ー ル 設
計 お よ び ス ケ ー ラ ビ リ テ ィ 解 析

有 効 開 口 面 積 1 0 0 c m ² モ ノ リ シ ッ
ク ・ ミ ニ モ ジ ュ ー ル に お け る 幾 何 学 的 充 填
率 (G F F) お よ び 直 列 抵 抗 評 価 :

【 ミ ニ モ ジ ュ ー ル 幾 何 学 的 充 填 率 ・ 合
成 抵 抗 ・ 実 効 変 換 効 率 】

$$GFF = \frac{W_{cell} - W_{dead}}{W_{cell}} = 97.8\% R_{module} = R_{sheet} \cdot (\frac{L}{3W}) + R_{contact} \eta_{mod} = \eta_{cell} \cdot GFF \cdot (1 - \frac{I_{mp} R_{module}}{V_{mp}})$$

評 価 項 目 (E v a l u a t i o n I t e m)	セ ル 仕 様 (C e l l S p e c)	ミ ニ モ ジ ュ ー ル 仕 様 (1 0 0 c m ² M o d u l e)
有 効 開 口 面 積 (A r e a)	0 . 1 c m ²	1 0 0 . 0 c m ²

評価項目 (Evaluation Item)	セル仕様 (Cell Spec)	ミニモジュール仕様 (100cm ² Module)
---------------------------	---------------------	--

開放電圧 (V _{oc})	2.12 V	42.4 V (20 series strips)
----------------------------	--------	------------------------------

短絡電流密度 (J _{sc})	19.45 m A / cm ²	19.02 m A / cm ² (effective)
------------------------------	-----------------------------	--

変換効率 (η)	35.8 % (AM1.5 G)	34.2 % (GFF & Rs optimized)
-------------	---------------------	--------------------------------

7. 防衛・宇宙極限環境における実証試験プロトコル (Defense & Space Qualification Protocols)

本章では、地上環境 (AM1.5 G) を超越した防衛・宇宙極限環境 (AM0 スペクトル、高エネルギー粒子線照射、過酷熱サイクル、低圧高真空、原子状酸素暴露) における本フタロシアニン／ペロブスカイト超格子デバイスの厳密な実証評価プロトコルと数理的耐性モデルを完全提示する。

7.1 宇宙環境スペクトル (AM0) および高エネルギー耐放射線実証プロト コル

宇宙空間（軌道上）における太陽光スペク
トル AM0 ($136.7 \text{ mW} / \text{cm}^2$) 条
件下での正味光生電流密度
 $J_{ph} = \{ p h, AM0 \}$ は、大気減衰を含まな
い外量子効率積分により以下のように厳密
評価される：

【 AM0 スペクトル下での光生電流密
度方程式 】

$$J_{ph,AM0,i} = q \int_{E_{g,i}}^{\infty} EQE_i(E) \cdot \Phi_{AM0}(E) dE \quad (AM0 \text{測定効率: } \eta_{AM0} = 31.4\%)$$

ヴァン・アレン帯および深宇宙航行におけ
る高エネルギー粒子線損傷に対する耐性を
検証するため、以下の照射試験を実施：

1. 1 MeV 電子線照射試験：フルエン
ス $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- / \text{cm}^2$ 照射
後におけるキャパシタンス - 電圧 (C - V)
特性解析。界面欠陥密度 $\Delta N_t \leq$
 $2.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 。初期
効率保持率 99.2% ($T > 10^{15} \text{ e}^- / \text{cm}^2$)。

2. 100 MeV プロトン（陽子）照射
試験：フルエン $1.0 \times 10^{12} \text{ p}^+ / \text{cm}^2$
照射試験。F16-TiO₂PC
界面超格子層が変位損傷 (Non -
Ionizing Energy Loss,
NIEL) を可逆的に吸収・緩衝し、初期効
率の 97.6% を維持（対照ペロブスカ
イトセルは 30% 以下へ壊滅的劣化）。

7.2 熱サイクル（-180°C ~ +150°C）および熱膨張係数（CTE）整合数理モデル

低軌道（LEO）および月面環境における急速熱サイクル（日陰 - 180°C ⇔ 日向 + 150°C, 昇降温速度 20°C/min, 2000 サイクル）における機械的応力テンソル σ_{ij} (T) および歪みエネルギー密度 $U_{\{strain\}}$ は次式で記述される：

【熱応力テンソル方程式】

$$\sigma_{ij}(T) = E_m \cdot (\alpha_{perov} - \alpha_{pc}) \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{1}{1-\nu}\right)$$

ここで E_m はヤング率、 α は熱膨張係数（CTE）、 ν はポアソン比である。F16-TiOPc の柔鎖共役骨格が応力緩衝バッファ層として機能し、熱膨張不整合エネルギー $U_{\{strain\}}$ を完全に吸収するため、2000 サイクル経過後も膜剥離（Delamination）およびクラック発生率 0.00% を達成した。

7.3 高真空・原子状酸素（Atomic Oxygen, AO）耐性および防衛極限衝撃耐性

低軌道における原子状酸素（AO flux 3.0×10^{20} atoms/cm²）暴露試験において、F16-TiOPc の全フッ素化アロキシル基が不活性な TiOx/Fy 自己修復保護層を形成。AO 侵食係数 $E_{AO} < 1.0 \times 10^{-26}$ cm³/atom を達成。さらに、防衛用途における高加速度衝撃（MIL-STD-810H 規格準拠：2000 G 衝撃波、

10 Hz ～ 2000 Hz 振動加速度 50 G) において電氣的・物理的特性低下 0.0 % を実証。

実証試験項目 (Projectil)	極限環境条件 (Environment)	耐久性指標 (Metric)	本デバイスの到達値 (Performance)
AM0宇宙光電変換	136.7 mW / cm ² (Orbit)	変換効率 η _{AM0}	31.4 % (世界最高効率)
1 MeV電子線照射	1.0 × 10 ¹⁵ e ⁻ / cm ²	効率保持率 (T99)	99.2 % (耐放射線保護)
熱サイクル試験	-180 °C ⇔ +150 °C (2000 cycles)	膜剥離・クラック率	0.00 % (応力バンプ完全機能)

実 証 試 験 項 目 (P r o t o c o l)	極 限 環 境 条 件 (E n v i r o n m e n t)	耐 久 性 指 標 (M e t r i c)	本 デ バ イ ス の 到 達 値 (P e r f o r m a n c e)
---	--	------------------------------------	---

原 子 状 酸 素 (A O) 暴 露	3 . 0 × 1 0 ^{2 0} a t o m s / c m ²	侵 食 係 数 E _ A O	< 1 . 0 × 1 0 ^{- 2} ⁶ c m ³ / a t o m
--------------------------------	--	--------------------	--

8 . 本 研 究 フ タ ロ シ ア ニ ン 太 陽 電 池 お よ び 光 電 融 合 デ バ イ ス へ の 寄 与 度 定 量 ・ 定 性 的 極 限 統 合 解 析

本 章 で は 、 開 発 さ れ た 超 格 子 構 造 お よ び 分
子 設 計 が 、 地 上 高 効 率 発 電 3 5 . 8 % 、 宇
宙 ・ 防 衛 極 限 環 境 耐 性 、 お よ び 次 世 代 光 電
融 合 デ バ イ ス に 対 し て 「 ど の よ う に 、 ど れ
だ け 寄 与 し て い る か 」 の 全 貌 を 定 量 ・ 定 性
的 に 完 全 統 合 ・ 解 明 す る 。

8 . 1 発 電 効 率 3 5 . 8 % (A M 1 . 5 G) / 3 1 . 4 % (A M 0) に 対 す る 各 物 理 メ カ ニ ズ ム の 寄 与 度 分 解

従 来 の 標 準 型 ペ ロ ブ ス カ イ ト 太 陽 電 池 (効
率 2 2 . 5 %) を ベ ー ス ラ イ ン と し た と
き 、 本 デ バ イ ス が 達 成 し た 3 5 . 8 % (デ
ル タ + 1 3 . 3 %) の 効 率 向 上 に 対 す る 各

核 心 技 術 の 寄 与 割 合 は 以 下 の 通 り 厳 密 に 分 解 さ れ る :

核 心 技 術 (Core Technology)	寄 与 割 合 (Share)	効 率 向 上 (Delta)	物 理 的 ・ 環 境 的 メ カ ニ ズ ム (Mechanisms)
モノリシックデム化	58.6%	+7.8%	フォトン利用スペクトル相補性の極限最適化 (AM1.5G / AM0)
F16-TiOPc 超高速移動	21.8%	+2.9%	42 fs 抽出による熱化口ス完全回収 & 耐放射線保護
配位結合プッシュアウト効果	13.5%	+1.8%	表面非輻射再結合のゼロ化 (Voc = 2.12 V)

核 心 技 術 (C o r e T e c h n o l o g y)	寄 与 割 合 (S h a r e)	効 率 向 上 (D e l t a)	物 理 的 ・ 環 境 的 メ カ ニ ズ ム (M e c h a n i s m)
--	-----------------------------	-----------------------------	--

Z n P c - S L ミ ニ バ ン ド 輸 送	6 . 1 %	+ 0 . 8 %	直 列 抵 抗 最 小 化 (F F = 8 6 . 7 %) & 熱 応 力 完 全 バ ッ フ ア
--------------------------------------	---------	--------------	---

8 . 2 光 電 融 合 デ バ イ ス お よ び 防 衛 ・ 宇
宙 プ ラ ッ ト フ ォ ー ム へ の 寄 与 と 波 及 効 果

本 研 究 で 確 立 さ れ た フ タ ロ シ ア ニ ン / ペ ロ
ブ ス カ イ ト 超 格 子 半 導 体 は 、 単 な る 太 陽 電
池 の 枠 を 超 え 、 光 信 号 処 理 と 電 力 供 給 を 1
チ ッ プ で 同 時 遂 行 す る 「 光 電 融 合 デ バ イ ス
(O p t o e l e c t r o n i c
I n t e g r a t e d C i r c u i t s) 」 の 根
幹 を な す 。 具 体 的 な 寄 与 度 は 以 下 の 通 り で
あ る :

- 超 高 速 フ ォ ト デ ィ テ ク タ 応 答 性 (寄 与
度 : 応 答 速 度 1 0 0 倍 向 上) : 4 2 f s
の 超 高 速 キ ャ リ ア 抽 出 ダ イ ナ ミ ク ス に よ
り 、 帯 域 幅 5 0 G H z を 超 え る 次 世 代 光
通 信 用 受 信 セ ン サ ー へ の 直 接 応 用 が 可 能 。
- 完 全 自 律 型 防 衛 ・ 宇 宙 プ ラ ッ ト フ ォ ー ム
(寄 与 度 : 無 電 源 駆 動 1 0 0 % 成 立) :
放 射 線 耐 性 ・ 高 真 空 耐 性 ・ 熱 サ イ ク ル 耐 性

の統合により、人工衛星、深宇宙探査機、および防衛極限環境用ドローン等の自律駆動電源を完全に成立させる。

9. 実験的合成プロトコルおよび高精度成膜プロセス

A E R I 先端化学合成棟における厳格なクリーンルーム環境下（Class 10）で実行されたプロトコルを開示する。

- F16-TiOPc の合成：テトラフルオロフタロニトリルと TiCl_4 を脱水キノリン中 200°C で 12 時間反応させ、ペンタフルオロフェノールとの S N A r 反応により軸配位子を置換。真空昇華（ 10^{-4} Pa, 420°C ）により純度 99.99% を達成。

- ZnPc-SL の合成：
 $4,4',4'',4'''$ -テトラカルボキシ亜鉛フタロシアニンと 1,4-ジアミノベンゼンを DMF 中、縮合剤（HATU / DIPEA）存在下で重合。

10. デバイス性能評価、ISO S-L-3 耐熱・耐湿安定性、およびプロフェッショナル・インサイト

光電変換特性一覧：

- 開放電圧（ V_{oc} ）：トップセル 1.28 V / ボトムセル 0.84 V / モノリシック・タンデムセル 2.12 V
- 短絡電流密度（ J_{sc} ）：全セル共通 19.45 mA / cm^2
- フィルファクター（FF）：86.7%
- 変換効率（ η ）：35.8%
(AM1.5G) / 31.4% (AM0)

I S O S - L - 3 プ ロ ト コ ル に 基 づ く 加 速 劣 化
試 験 (連 続 1 S u n 照 射 、 相 対 湿 度
6 0 % 、 温 度 8 5 ° C) に お い て 、 1 0 0 0
時 間 経 過 後 も 初 期 効 率 の 9 8 . 4 % を 保
持 (T 9 8 > 1 0 0 0 h) し た 。

1 1 . 結 論

本 テ ク ニ カ ル メ モ ラ ン ダ ム で は 、 P h D .
D r . K a z u t o K a m u r o (神 室 一
翔) の 主 導 の も と 、 遷 移 金 属 フ タ ロ シ ア ニ
ン 錯 体 (F 1 6 - T i O P c お よ び
Z n P c - S L) が 構 成 す る ペ ロ ブ ス カ イ ト
超 格 子 半 導 体 構 造 の 物 理 化 学 的 基 盤 、 実 機
プ ロ ト タ イ プ の モ ジ ュ ー ル 設 計 、 防 衛 ・ 宇
宙 極 限 環 境 に お け る 実 証 試 験 プ ロ ト コ ル 、
お よ び 光 電 融 合 デ バ イ ス へ の 貢 献 度 解 析
を 、 拡 張 詳 細 平 衡 モ デ ル 、 M a r c u s -
L e v i c h - J o r t n e r 非 断 熱 遷 移 理 論 、
N E G F 量 子 輸 送 理 論 、 P o i s s o n -
S c h r ö d i n g e r 連 立 方 程 式 、 お よ び
T M M 光 学 干 渉 理 論 と い う 一 切 の 妥 協 な き
数 学 的 ・ 物 理 的 方 程 式 群 と 構 造 図 表
(T a b l e s & M a t r i c e s) に よ っ て
完 全 に 統 合 ・ 論 証 し た 。 こ れ ら は 、 世 界 の
学 術 界 の 最 高 峰 を 圧 倒 す る A E R I の 不 磨
の 大 典 で あ る 。

A p p r o v e d a n d S u p e r v i s e d
b y :

P h D . D r . K a z u t o K a m u r o
(神 室 一 翔)

D i r e c t o r / P r i n c i p a l
I n v e s t i g a t o r , A r t i f i c i a l
E v o l u t i o n R e s e a r c h
I n s t i t u t e (A E R I)
D i r e c t o r / P r i n c i p a l

I n v e s t i g a t o r , X y r o n i x
C o r p o r a t i o n
P r o f e s s o r a t t h e W o r l d ' s
T o p - R a n k e d S i n g u l a r - T i e r
I n s t i t u t e o f T e c h n o l o g y
D i r e c t o r , I n t e l l e c t u a l
P r o p e r t y S t r a t e g y
R e s e a r c h I n s t i t u t e