

論 文

将来の素材文明における灯火概念に関する素材文化学的研究
—一夜と昼を受容する電子ローソクの新概念の提出—

牧 野 和 孝

Materials Culturology Discussions on The Concept of "Light" in Future Materials Civilization
—Presentation of The Concept of Electric Candle Accepting "Night and Day" as They are—

by

Kazutaka MAKINO

In this paper, in order to create a new concept of "light" in future materials civilization, the light technologies in various pre-modern materials civilizations accepting "night and day" as they are, were taken into notice and discussed from a point of materials civilization. As the result, "electric candle" was conceptually presented as a new concept "light" accepting "night and day" as they are. And the feasibility was fundamentally discussed from a point of materials engineering and culturology.

The following results were obtained.

- i) In various pre-modern materials civilizations accepting "night and day" as they are, natural regenerable materials can be pointed out to be chosen as light materials and satisfy the condition of the keeping the consumption not to increase enormously.
- ii) The "electric candle" accepting "night and day" as they are, is operated by use of water and sun light only as energy sources. And it satisfies the condition of i).
- iii) The "electric candle" accepting "night and day" as they are, is assembled by three of water decomposition by sun light, hydrogen fuel cell, and white color light emitting diode.
- iv) SiTiO_3 , $\text{Sr}_{0.875}\text{Pb}_{0.125}\text{TiO}_3$, and $\text{Sr}_{0.75}\text{Pb}_{0.25}\text{TiO}_3$, are selected as optimum water decomposition catalysts and are assembled as the catalyst elements by pin-junction.
- v) Thin film of $\text{Zr}_{1-y-z}\text{Ca}_y\text{Ge}_z\text{O}_{2-y}$ ($y = 0.2\sim 0.3$, $z = 0.18\sim 0.20$) is pointed out to be able to be used as solid electrolyte operating at normal temperature.

平成8年12月18日受付

秋田大学鉱山学部資源・素材工学科

〒010 秋田市手形学園町1-1

Dept. of Materials Engineering for Resources, Mining College, Akita University 〒010 1-1, Tegatagakuen-Cho, Akita, Japan

vi) White color light emitting diode is realized by the combination of GaAs(red), GaP_{1.0,25}N_{0.25}(green), and Zn_{1.0,05}Mg_{0.05}Se_{1.0,05}S_{0.05}(blue).

vii) Necessary dimensions of electric light to emit white color light of 1 candle for two hours in night after being irradiated by daylight for seven hours are estimated as follows ; Hydrogen fuel cell, white color light emitting diode and water decomposition part are respectively 5cm × 2cm × 2cm, 1.0cm φ × 0.65m, and 4.0cm φ × 150cm.

viii) The concept of "electric candle" can be taken to indicate the "proto type" of white colour light in futue materials civilization.

Key Words : Electric Candle, Water Decomposition Catalysts, Light Emitting Diode, Future Materials Civiligation

緒言

光は古来文学, 哲学, 宗教において比喩として用いられてきた。西欧では光は生命の充実, 清浄さ, 自由, 希望, 喜び, 世界認識とその力, 神的なものの顕現など形而上学的なものを意とした。一方, 東方では光は形而上学的なものではなく自然的なものと考えられてきた。

人々にとって昼は光の世界であり, 夜は暗黒の世界である。そして, 暗黒を光により克服することにより, 文明を創造し, 人生をよりよく享受し, よりよく生きること努めてきた。

かつて, 人類の利用する光の主体は自然光であった。このことは現代でも変わりなく多くの人々は昼光のもとで生活を営んでいる。

人工の光線は人類が火を入手すると同時にはじまった。火の制御法と利用法を開発し, 人類は技術をものにし灯火を多彩に発達させた。しかし, 夜も昼のように明るく照明されるようになったのは電灯の発明以後である。

電池の発明は夜を克服し, 昼を拡大する照明技術の事実上の最初の近代化を意味している。

デービーが電灯としてアーク灯を発明し, 街路灯に利用した1808年が近代照明技術の原点と考えられる^{1), 2)}。1879年にエジソンの実用的白熱電灯が^{3), 4)}, 1919年にはクロードのネオンサインが発明された^{5), 6)}。そして, 1938年のイトマンの蛍光灯の実用化により現代の照明技術の体系がほぼ完成され, 現在に至っている^{7), 8)}。

その結果現代素材文明は夜を昼とし, 昼も夜も人々を労働と消費へと刺激し益々構造的に消費文明化しつ

つある。⁹⁾ そこで, 本報では現代素材文明の消費文明化を克服するために夜と昼とを受容する新しい照明技術の解明について素材文化学的に検討する。その結果太陽光と水のみをエネルギー源として用いる新しい“電子ローソク”という概念を提出する。

1. 夜と昼と文明との関係

人々はそれぞれの生活様式を有している。ある社会の成員が共有している生活の営み方, とくに人間の基本的活動である生産(仕事), 消費(余暇), 再生産(家族生活)の本質と関係について共有している認識と行動の枠組のことを生活様式という。

これまでの産業社会では, 生産, 消費, 再生産の関係は勤労倫理という生産領域の原理により調和的に統括されている。そのため勤労の気風(エートス)が生み出した生産主義や業績主義そのものが, 生産に従属した消費構造からくる生活様式の均一化, 資源・環境問題の深刻化, 一定の業績期間評価内には達成困難な課題に進んで取り組むことを回避する心理的雰囲気醸成される危険を大きくしたり, あるいは数値化に適さない価値の高い課題が軽視される風潮を醸成する危険性を増大させるなどの問題をつくりだしている。

生産主義や業績主義をパラダイムとする社会は新しい文明を創造する活力を失ない, より多くの生産とより多くの受動的消費を構造的につくりだす。その結果人々は朝早くから夜遅くまで生産し消費する。つまり, 人々は夜は電灯をつけ, 人工昼にし, 夜を追放する。そして, 昼は屋内で電灯をつけ, 人工夜にし, 昼を追放する。

つまり, 勤労の気風(エートス)が生み出した生産主義や業績主義のパラダイムは自然の仕組としての夜

と昼とを逆転させる。

その延長線上にレジャー時代が現われ、大衆化現象の幕明けとなる。こうして余暇の気風（エートス）という消費領域の原理が導入され、豊かな社会というパラダイムが構築され現在にいたっている。

しかしながら、余暇が本来個人の主体的、自発的活動であるとしても、多かれ少なかれ社会的な形態規定をうける。余暇のブーム現象を見ればよく理解できる。そして人々の余暇への欲求を開拓し、組織化し、一定のビジネスを形成する企業化が進行する。その結果余暇の形態が積極的なものから消費的なものへと変わる。

余暇が管理・編成された時間の消費ということになれば、勤労の気風（エートス）の場合と同様、余暇商品の生産と受動的な“時間”の消費が構造的につくりだされる。

つまり、余暇の気風（エートス）が勤労の気風（エートス）の轍を踏もうとしている。

夜は夜とし、昼は昼として自然の仕組をあるがままに受容する文明をつくる代りに夜と昼とを逆転させているのが現代の産業社会である。

こうして物質、エネルギー、そして時間を無尽蔵に消費することを善とする現代の産業社会が夜と昼との逆転によりささえられていることを指摘できる。

以上の観点から、夜は夜として、昼は昼として自然の仕組みをあるがままに受容する文明を構築する照明技術の概念について以下検討する。

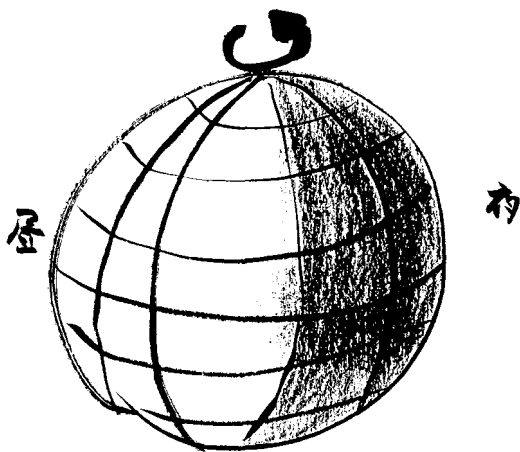


Illustration 1

II. 夜と昼をあるがままに受容する素材文明としての灯火についての素材文化学的考察

II. 1 夜と昼とその神話

地球がまわって朝となり、太陽の光が地上に降り注ぎ、そして夜となり、夜空に星がキラメキ、ひそかに雲が誕生しはじめ、昼の熱が宇宙へと放出される。

昼から夜への境に夕べが、夜から昼への境に朝がある。そしていづれの境も市民薄明、航海薄明、および天文薄明の3つの薄明の連続的な連りからなる。

夜と昼と人々とのかわかりが時代の文明とパラダイムを規定する。そして、文明のパラダイムはその文明の神話を表現している¹⁰⁾。そこで、本節では夜と昼を受容する種々の近代以前の素材文明における灯火の概念について素材文化学的に考察する。

II. 1. 1 近代以前の日本の夜と昼

近代以前の日本では、昼から夜への境は“たそがれ時”と呼ばれ神隠しなどの不思議な出来事よく起きる時刻と考えられていた。それは夕方薄暗くて人の見分けのつかない時をいう。

一方、“かはたれ時”は夜から昼への境の明け方の薄暗い時をいう。これもこの世と異界とが交わる、神や魔物が退散する時とされていた⁹⁾。

人々は明るいうちは働き、暗くなると眠るという生活様式を確立していた。つまり、夜と昼をあるがまま

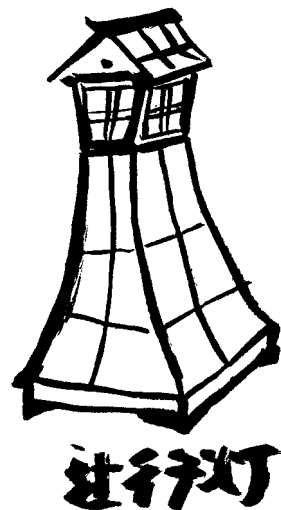


Illustration 2

受け入れていた。このことは人々の生活様式が自然との共存というエコロジー領域の原理により調和的に統轄されていることを意味している。その結果素材開発は自然との共存のエートスを原理に依拠しつつ展開された。そして行灯（あんどん）、ランプなどの灯火が開発された。

Ⅱ. 1. 2 ギリシャの夜と昼の神話

ギリシャの神話では、昼は災いの夜とは一緒にいられない。

夜ニクスは原古に混沌の淵カオスから生まれた女神で、その力は神々の王ゼウスによってもはばかわれている。そして、夜ニクスが生んだ娘が昼の女神ヘメラである。同じ館に住んでいるが、一方が帰ってくると他方は館から出ていき行き、挨拶をかわすだけで一緒にいることは決してない。また、夜ニクスは眠りの神ヒュプノス、死の神タナトス、争いの神エリスも生んだので災いたちの祖母神とも呼ばれた。

夜は昼の母であり災いの祖母神と考えられているが、人々は夜を畏敬と畏怖をもって受け入れた。つまり、自然との共存のエートスの原理に導かれたパラダイムが人々の心を占めた。この観点から照明技術がとられ、炬火、松明などが暖房、炊事、虫よけなどの諸機能を併用して灯火として開発され使用された。これらの灯火は夜と昼の境に用いられ、夜も昼もあるがままに受け入れる照明技術として機能した。

Ⅱ. 1. 3 北欧の夜と昼の神話

北欧の神話では、夜と昼は互いに補ぎない合いながら共存している。

夜ノートはハンサムな息子ダグを生む。二人は神々の王オーディンからそれぞれ車と馬を授けられ、交代で空中をまわせるように命じられる。

夜ノートは彼女の馬のたてがみから夜の間に地上に霜を降り敷き、朝方にはくつわの泡を地面にこぼして朝露をつくる。昼ダグは彼の馬のたてがみから明るい光を発して、空中と地上を照らす。

夜と昼は互いに役割分担をし、人々はそれをおるがままに受け入れることによって世界を理解し生きること意義を感じた。

こうした自然との共存のエートスに導かれた照明技術として灯火、松明、ローソク、ランプなどが受容された。

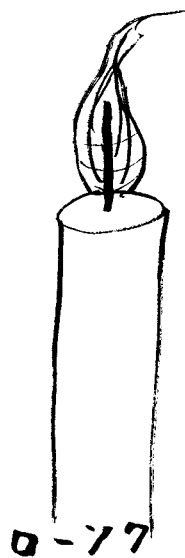


Illustration 3

Ⅱ. 1. 4 古代インドの夜と昼の神話

古代インドの神話では、夜は毎晩昼を生みつづける。しかし、子供の昼を自分で育てることはできない。

昼が分娩されると夜は消滅しなければならないので、夜は子供の昼の養育を妹の曙に依頼する。そして曙が闇の悪魔を追払い昼の世界を来たらず。

世は昼を生む慈しみ深い母神であると同時に昼の到来を妨げる悪魔である。¹⁰⁾

曙を介した夜と昼との共存という捉え方に一つの特徴がある。互いに相反する夜と昼とを統合する曙という概念が昼と夜とを夕方時統合する照明技術という概念の導入を許容している。

こうして自然との共存のエートスに依拠する照明技術として灯火、松明、ローソク、ランプなどが用いられた。

Ⅱ. 1. 5 インドネシア・セラム島原住民ウェマーレ族の夜と昼の神話

インドネシア・セラム島原住民ウェマーレ族の神話では、夜は人間に主食である種々のイモを与える創造主であり、死してからは冥府へのつらい旅を人間に仕組んだ悪魔でもある。¹⁰⁾

そして、昼は夜が支配しているものの1つであり、両者は主従関係的に共存している。このことは夜を昼

化する照明技術は夜を侵害しない範囲内で開発されねばならないことを意味している。ここに自然との共存のパラダイムを見ることが出来る。そして、人々は灯火、松明、樹脂ローソクなどの照明技術を使い伝えた。

II. 1. 6 ニュージーランドのマオリ族の夜と昼の神話

ニュージーランドのマオリ族の神話では、夜は森の神の子であり、成長して父である森の神の妻となったが、これを恥じ、自殺して夜の女神となる。そして、父である森の神が地上で昼養う子孫の人間たちを暗黒と死に引き下ろす畏怖的存在となる。¹⁰⁾

つまり、森のなかで昼と夜とは対立的に共存する。夜は暗黒の世界としてあるがままに受け入れられる。したがって暗黒の夜を破壊しない範囲内で照明技術が工夫された。それが照松明であり、灯火である。

以上いずれの場合も夜と昼をあるがままに受け入れる自然との共存を原理とする素材文明を確立していたことがわかる。

夜は夜として昼は昼として受容する素材文明により人間と自然との共存系を持続させる可能性が示唆される。こうした素材文明における照明技術の特徴は、照明時間、照明空間、およびエネルギー源という観点から夜を夜として受容し夜を侵害しない許容範囲内にありかつ自然再生的である点にある。

これらの点を満たす代表的なエネルギー源(灯火素材)としては以下のようなものがあげられる。

- 針葉樹や竹など、樹脂分に富む木材を手頃の長さ
に切ったもの
- カバなどの樹皮を筒状に巻いたもの
- 乾燥したココヤシの枯れ葉の束
- ゴム性の樹脂を樹皮やヤシ葉で包んだもの
- 乾燥したキャンドルフィッシュを棒の先端の割れ
目に挟んだもの
- アブラギリの実をココヤシ小葉の葉軸にくし刺し
にしたもの
- 樹脂を樹皮にしみこませたもの
- 固形脂肪を中心部の芯により燃やすもの
- 液体の油を灯芯により燃やすもの
- 動物性あるいは植物性脂肪、油を灯芯により燃や
すもの
- ガラス壺の部分にも水を入れ、その上に油を入れ
て灯芯に火をともし、水を通して光を分散放射させる

もの

これらの灯火素材はいづれも共通してあるがままの状態の自然の素材を燃料として用いている、穏やかな酸化反応速度の燃焼焔を光源としている、そして燃料の装填が回分式であることの3つの特徴を有していることがわかる。こうして灯火素材が自然再生素材でその消費量がむやみに増大しない仕組にできる。

つまり、自然との共存の気風(エートス)に依拠し、昼は働き夜は休息するという生活様式が巧みに確立されている。

以上のことは夜と昼を受容する灯火は自然再生素材でかつ消費量がむやみに増大しない仕組を満たすことにより実現できることを意味している。

II. 2. 素材文明における夜と昼を受容する電子ローソク の概念とその素材物性学的考察

前節の考察より、夜と昼を受容する灯火素材は次の2つの条件を満足させることにより実現できると指摘できる。

- i) 自然再生素材の使用
- ii) 素材消費量をむやみに増大しない仕組をもつ

上述の2つの条件が大量消費時代の現代において同時に満足されることは極めて困難である。なぜならば現代の大量消費というパラダイムそのものが条件ii)と矛盾するからである。

このような観点から、本報では現代において夜と昼を受容する灯火について検討する。そこで、安定供給資源としての太陽光と水をエネルギー源とする Fig. 1 に示す“電子ローソク (Electric Candle)”なる概念を提出し、その可能性を素材物性学的に考察する。

これによれば電子ローソク の概念は昼の間は太陽光エネルギーを用いて水 (H_2O) を水素 (H_2) と酸素 (O_2) に分解し、夜の間は昼の間分解して得た水素 H_2 と酸素 (O_2) を燃料極とする燃料電池により三原色発光ダイオードを発光させ、灯火とするものである。

そこで本報では水分解セラミクス触媒、燃料電池用固体電解質、および三原色発光ダイオード素材を素材物性学的に検討する。

II. 2. 1 常温作動水素燃料電池用固体電解質の素材設計について

固体酸化物型素材燃料電池は Fig. 2 のように燃料

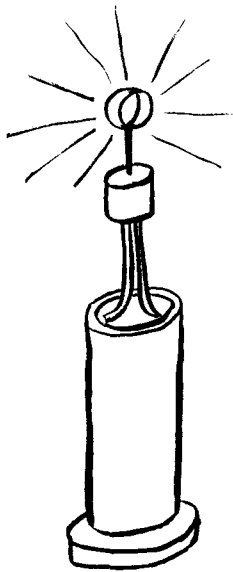


Fig. 1 The conceptual illustration of electric candle

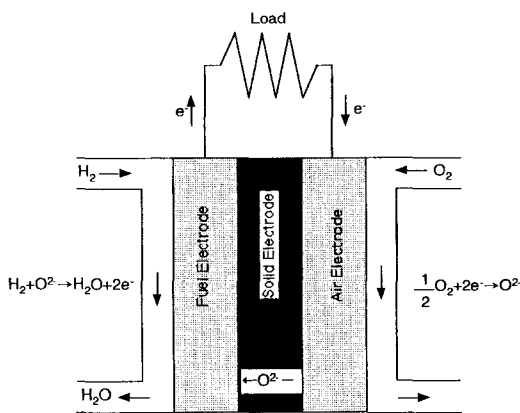
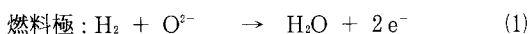


Fig. 2 The conceptual diagram of solid oxide type of hydrogen fuel cell

極, 固体電解質および空気極から構成される。そして燃料極ならびに空気極においてそれぞれ次のような反応が生じる。



したがって, 全体として次のような反応となり, 理論標準起電力0.912 Vを生じる。



式(3)の反応は以下に示す多段ステップを経て進行する。

i) 多孔質空気極の空孔中への酸素分子 (O_2) の拡散

ii) 多孔質空気極表面上への酸素分子 (O_2) の吸着

iii) 多孔質空気極表面上で酸素分子 (O_2) と電荷 e^- との反応により酸素イオン (O^{2-}) 化

iv) 酸素イオン (O^{2-}) の固体電解質表面への拡散

v) 酸素イオン (O^{2-}) の固体電解質内での燃料極側への拡散

vi) 酸素イオン (O^{2-}) の燃料極側固体電解質表面での水素 (H_2) との反応

従来の水素燃料電池は, 多孔質空気極として化学組成, $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.02 \sim 0.10$), 厚さ1~2 mm, 固体電解質としてカルシア安定化ジルコニア, $\text{Zr}_{1-y}\text{Ca}_y\text{O}_{2-y}$ ($y = 0.2 \sim 0.3$), 厚さ1~2 mm, 多孔性燃料極としてNiとイットリア安定化ジルコニア, $\text{Zr}_{1-z}\text{Y}_2\text{O}_{2-z}$ ($Z = 0.2 \sim 0.3$), サーメット¹³⁾, 厚さ1~2 mmを使用し, 1,000°Cで作動する。

本報においては昼の光を常温常圧下で化学エネルギーとして蓄積し夜光として放出する電子ロックの開発を目的としている。したがって, 1,000°Cで作動する水素燃料電池は電子ロックには適用できない。

水素燃料電池を電子ロックに適用するためには常温常圧下で作動しなければならない。

水素燃料電池の常温作動化にとり最大の障壁は固体電解質カルシア安定化ジルコニアの導電率が低いことである。

そこで, 本節ではカルシア安定化ジルコニア, $\text{Zr}_{1-y}\text{Ca}_y\text{O}_{2-y}$ ($y = 0.2 \sim 0.3$), の導電率向上を素材設計学的に検討する。

CaO や Y_2O_3 のような低原子価の安定価剤をジルコニア, ZrO_2 , に固溶すると, 電気的中性条件を満たすように酸素イオン空孔が形成される。その結果, 酸素イオンと酸素イオン空孔との位置交換によりイオン伝導が生じる。したがって, 酸素イオン空孔濃度が増大するとイオン導電率が増大する。しかし酸素イオン空孔濃度がある値以上になると, イオン導電率は飽和し,

つについては減少する。カルシア安定化ジルコニアでは10～15重量%のCaOを固溶した $Zr_{1-y}Ca_yO_{2-y}$ ($y = 0.2 \sim 0.3$)でイオン導電率最大を示す。

Zr^{4+} (イオン半径 0.79\AA)のかわりにイオン半径の大きい Ca^{2+} (イオン半径 0.99\AA)の置換を増やすと格子歪び増大する。その結果酸素イオンと酸素イオン空孔との位置交換がしにくくなりイオン導電率が低下する。

さて、酸素イオンと酸素イオン空孔との位置交換のしやすさは主に酸素イオンの結合軌道のエネルギーと酸素イオン・酸素イオン空孔間距離に依存する。

前者は量子力学的的手法により¹²⁾、後者は格子歪びが生ずるさい陽イオンと陰イオンが重ならないという条件より幾何学的に求めることができる。

そこで、本報ではFig. 3のカルシア安定化ジルコニア, $Zr_{0.75}Ca_{0.25}O_{1.75}$ 、およびこのカルシア安定化ジルコニアのZr位置にGeを3.125%, 6.25%, 9.375%, 12.5%, 15.625%, 18.75%, 21.875%, 25%, 28.125%置換した10種類に対して結合軌道エネルギーの総和Sおよび酸素イオン・酸素イオン空孔間距離 ℓ をもとめた。Fig. 4からFig. 7にはこれらのうちの代表的な4つの場合の単位格子を示してある。また、Fig. 8には前者SのFig. 9には後者 ℓ の結果を示してある。た

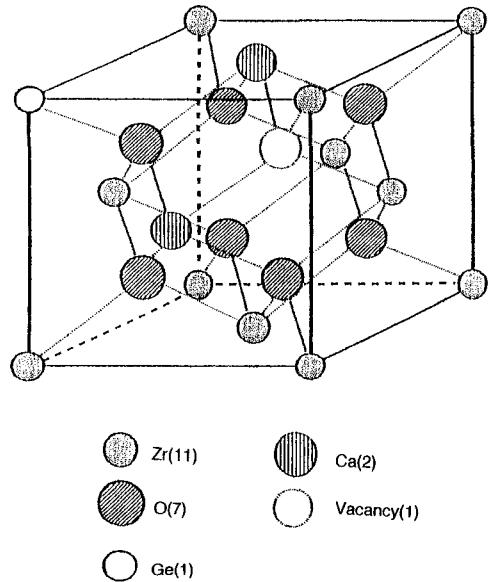


Fig. 4 Crystal structure of $Zr_{0.71875}Ge_{0.03125}Ca_{0.25}O_{1.75}$

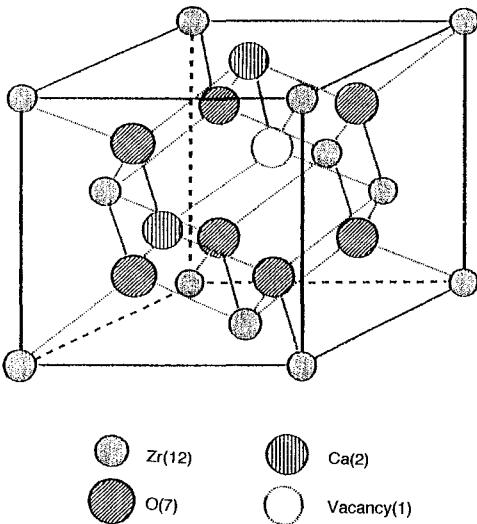


Fig. 3 Crystal structure of calcia-stabilized zirconia $Zr_{0.75}Ca_{0.25}O_{1.75}$

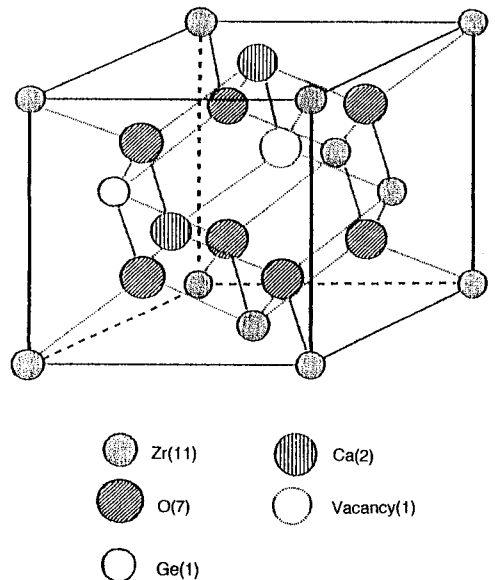


Fig. 5 Crystal structure of $Zr_{0.625}Ge_{0.125}Ca_{0.25}O_{1.75}$

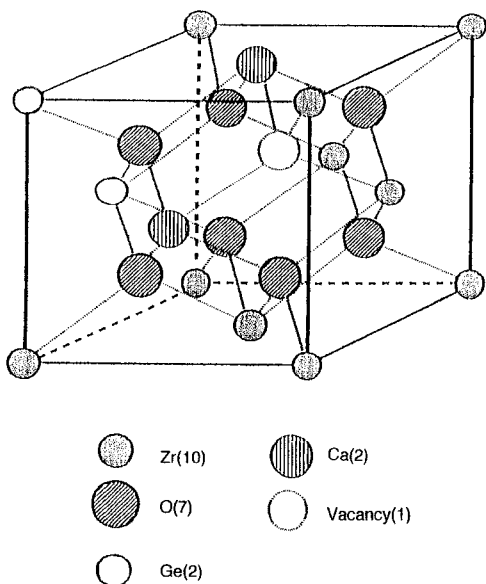


Fig. 6 Crystal structure of $Zr_{0.59375}Ge_{0.15625}Ca_{0.25}O_{1.75}$

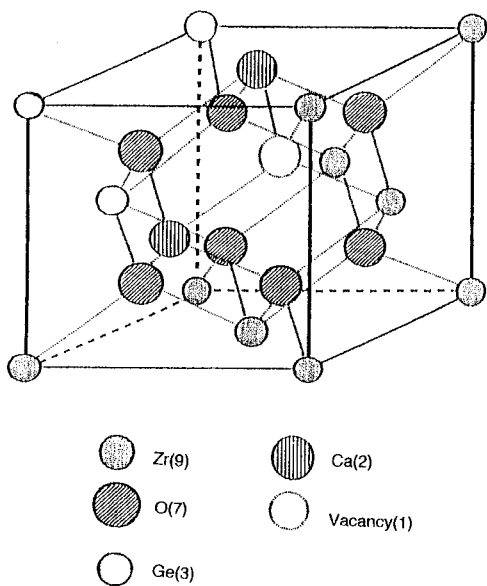


Fig. 7 Crystal structure of $Zr_{0.5625}Ge_{0.1875}Ca_{0.25}O_{1.75}$

だし、いずれの場合も Ge 置換率が 0% と 28.125% における値の差によって任意の Ge 置換率と 0% との差を規格化して表現してある。これによれば結合軌道エ

ネルギーの総和 S も酸素イオン・酸素イオン空孔間距離 ℓ も Ge 置換率の増大とともに増加していることがわかる。

一般に、イオン導電率は結合軌道エネルギーの総和 S の増加とともに減少し、酸素イオン・酸素イオン空孔間距離 ℓ の増加とともに減少する。したがって、イオン導電率は次式で定義される I^* により評価できる。つまり、 I^* が大きければイオン導電率も大きい。

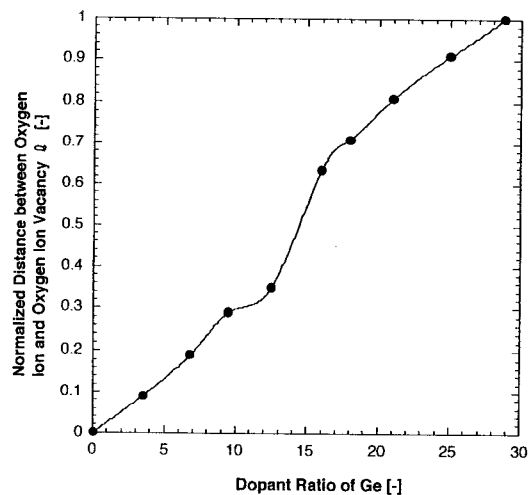


Fig. 8 Relation between normalized distance ℓ and dopant ratio of Ge

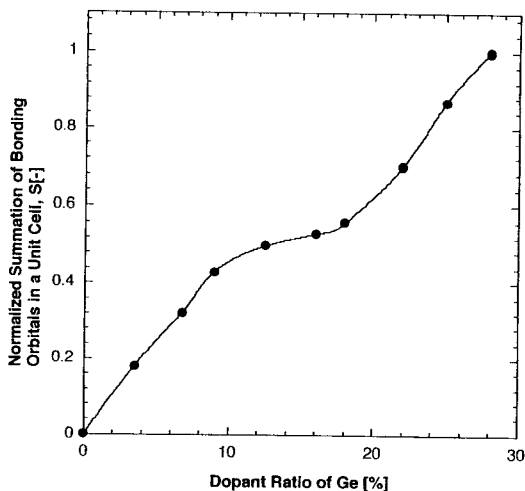


Fig. 9 Relation between summation of bonding orbitals S and dopant ratio of Ge

$$I^* = \frac{\ell}{S} \quad (4)$$

Fig. 8およびFig. 9より I^* はFig. 10のようになることがわかる。これよりGe置換率18~20%のカルシア安定化ジルコニア, $Zr_{0.75-z}Ca_{0.25}Ge_zO_{1.75}$ ($Z = 0.18 \sim 0.2$), が最大のイオン導電率すなわちGe置換率0%の場合の3倍を示すことがわかる。

ここでGe置換率0%のカルシア安定化ジルコニアが厚さ1~2mmで1,000°Cで作動することを考慮すれば, Ge置換率18~20%のカルシア安定化ジルコニアが常温下で作動するに必要な厚さ t は前者と同一のイオン導電率を実現するという条件から次式のようにもとまる。

$$t = (1 \sim 2 \text{ [mm]}) \times \left\{ \text{Ge置換率18~20\%のカルシア安定化ジルコニアのイオン導電率のGe置換率0\%のそれに対する比} \right\} \\ (\text{常温でのGe置換率0\%のカルシア安定化ジルコニアのイオン導電率}) \\ \hline (1,000^\circ\text{CでのGe置換率0\%のカルシア安定化ジルコニアのイオン導電率})$$

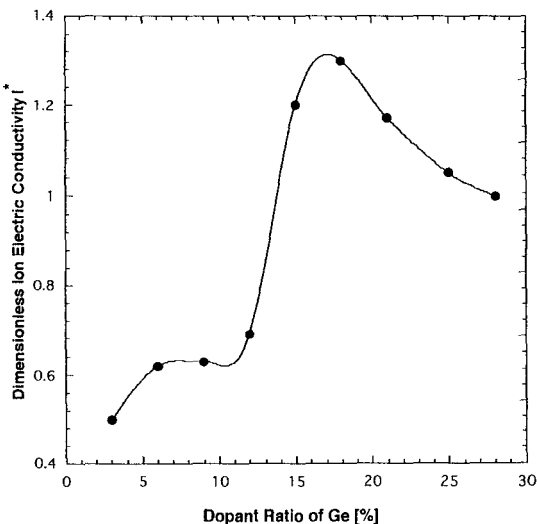


Fig. 10 Relation between dimensionless ion electric conductivity I^* and dopant ratio of Ge

$$= (1 \sim 2 \text{ [mm]}) \times 3 \times \frac{10^{-5} \text{ [S cm}^{-1}\text{]}}{10^{-2} \text{ [S cm}^{-1}\text{]}} \\ = 3 \sim 6 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (5)$$

式(5)はカルシア安定化ジルコニア, $Zr_{0.75-z}Ca_{0.25}Ge_zO_{1.75}$ ($z = 0.18 \sim 0.2$), (Ge置換率18~20%)を3~6 μm の薄膜固体電解質として使用できるよう工夫すれば, 常温作動の水素燃料電池を実現できることを意味している。

II. 2. 2 夜と昼を受容する電子ローソク用三原色発光ダイオードの分子設計

前章でも考察したごとく, 従来のローソクはパラフィン, ステアリン, 固体脂肪, ロー類などを主原料とし, 綿糸, 灯心, こよりなどを燭心として円柱状に作り, その燭心に点火し, 灯火をうる。

パラフィン, ステアリン, 固体脂肪, ロー類などのローソクの主原料の発熱量は40~50kJg⁻¹である。そして直径10mmのローソクの燃焼速度ならびに火焰温度はそれぞれほぼ0.005gs⁻¹, 2,000°Cである。したがって, 一秒钟あたり次式のエネルギーが消費されることがわかる。

$$(40 \sim 50) \times 10^3 \text{ [J} \cdot \text{g}^{-1}\text{]} \times 0.005 \text{ [g} \cdot \text{S}^{-1}\text{]} \\ = 200 \sim 250 \text{ [Js}^{-1}\text{]} \quad (6)$$

つまり, 光度1カンデラの光を放出するためには式(6)により与えられるエネルギー消費を必要とすることを意味している。

以下には, 光度1カンデラの白色光を発光する三原色発光ダイオードを材料設計学的に検討する。

Fig. 11には発光ダイオードの原理を概念的に示してある。これによれば発光ダイオードの原理はpn接合に順方向に電圧を印加して生成させた自由電子と自由正孔とを再結合させることにより波数 $\Delta E_g/h$ の光を発光させるものであることがわかる。ただし, h はプランクの定数である。したがって, エネルギーギャップ ΔE_g が1.98eV (赤色), 2.23eV (緑色) および2.65eV (青色)のそれぞれを有する素材を開発し, 各素材を用いて発光ダイオードとし, それぞれから互いに等しい光量を同一点源(空間)から同時発光すれば白色光が得られる。

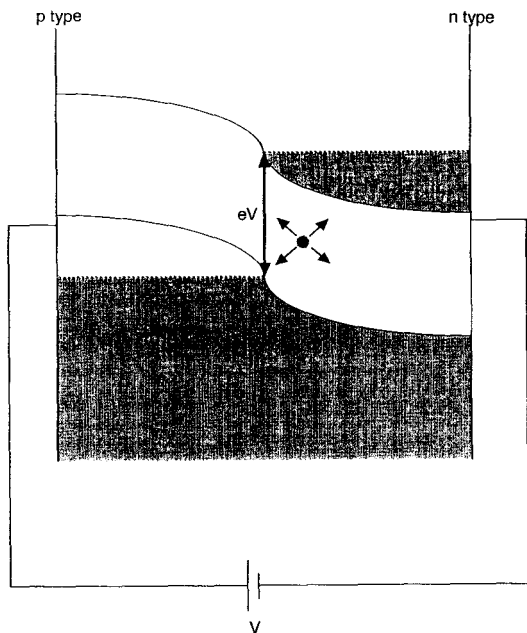


Fig. 11 Conceptual diagram of the principle of light emitting diode

II. 2. 2. 1 三原色発光ダイオード素材の材料設計学的考察

三原色発光ダイオードのうち、赤色発光ダイオードは Fig. 12 の単位格子を有する GaAs を用いることができる。しかしながら、緑色ならびに青色発光ダイオード素材はまだまだ十分実用化にはいたっていない。

そこで以下では緑色ならびに青色発光ダイオード素材を材料設計学的に検討する。

緑色発光ダイオード素材としてエネルギーギャップ ΔE_g が 2.24 eV の GaP に注目する。GaP は Fig. 13 に示す閃亜鉛型結晶（点群 Td）であるが、間接遷移発光のため発光効率が低い。

発光効率を向上させるため、GaP の P のかわりに N を Fig. 14 のように発光センターとしてドーピングする。このようにしても N は P と同様の価電子状態を保ち結晶構造の対称性は変わらない。しかしながら、電気陰性度は N の方が P より大きいため、N は自らに電子を引きつける励起子を形成する。そして、この励起子からの自由電子と価電子帯の自由正孔との再結合により発光する。これより発光センターを増やせば結果と

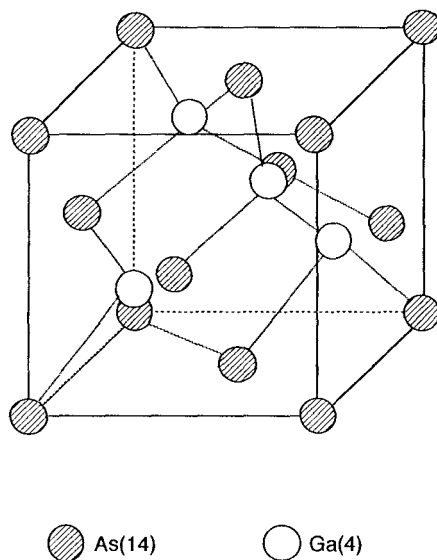


Fig. 12 Crystal structure of GaAs

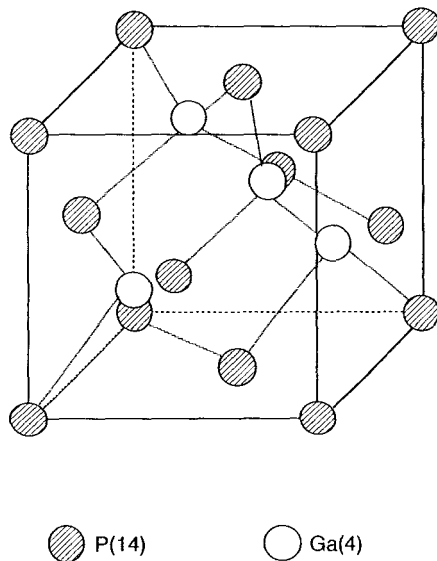
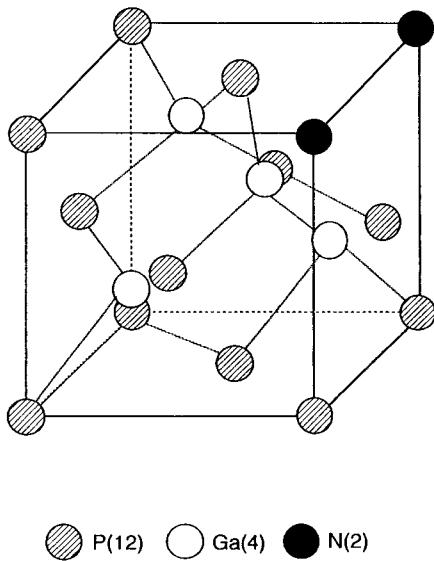
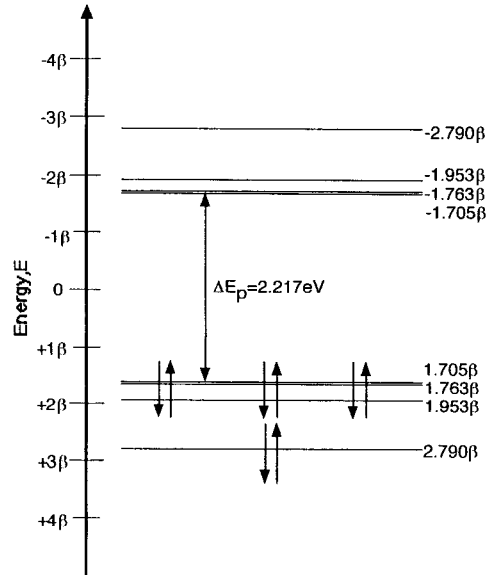


Fig. 13 Crystal structure of GaP

して発光効率が向上することがわかる。

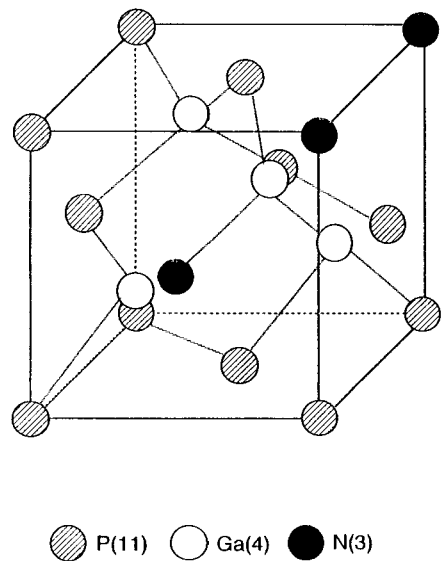
このとき励起子と価電子帯間のエネルギーギャップ ΔE_g が 2.21 ~ 2.24 eV 内となる必要がある。

Fig. 14 Crystal structure of GaP_{1-0.125}N_{0.125}Fig. 15 Electron energy band structure of GaP_{1-0.125}N_{0.125} ($\beta = 0.647$ eV)

2個の発光センターNをドーピングしたFig. 14の単位格子（化学組成GaP_{1-0.125}N_{0.125}）に対して量子力学と群論を用いて電子エネルギー帯構造をもとめるとFig. 15のようになる。これによればエネルギーギャップΔE_gが2.217 eVとなり前述の範囲内にあることがわかる。

さらに発光効率を向上させるために、Fig. 16のように3個の発光センターNをドーピングした化学組成GaP_{1-0.25}N_{0.25}に対して同様に電子エネルギー帯構造をもとめるとFig. 17のようになる。この場合エネルギーギャップΔE_gは2.20 eVとなり前述の範囲外となる。したがって、緑色発光ダイオード素材として前者のGaP_{1-0.125}N_{0.125}を使用することができると指摘できる。

最後に青色発光ダイオード素材としてエネルギーギャップΔE_g 2.57 eVのZnSeに注目する。純青色発光ダイオード素材としてはZnSeをエネルギーギャップΔE_gが2.65 eVとなるように素材設計する。そこでZnSeのZnのかわりにMgを、SeのかわりにSをドーピングした化学組成Zn_{1-x}Mg_xSe_{1-y}S_yのタイプを検討する。xとyとを互いに等しく0, 0.05, 0.15および0.25の4つの場合に対して周期ポテンシャルのフーリエ解析法を用いてエネルギーギャップΔE_gをもとめた。その

Fig. 16 Crystal structure of GaP_{1-0.25}N_{0.25}

結果をFig. 18に示してある。これより化学組成Zn_{1-0.05}Mg_{0.05}Se_{1-0.05}S_{0.05}のエネルギーギャップΔE_gが

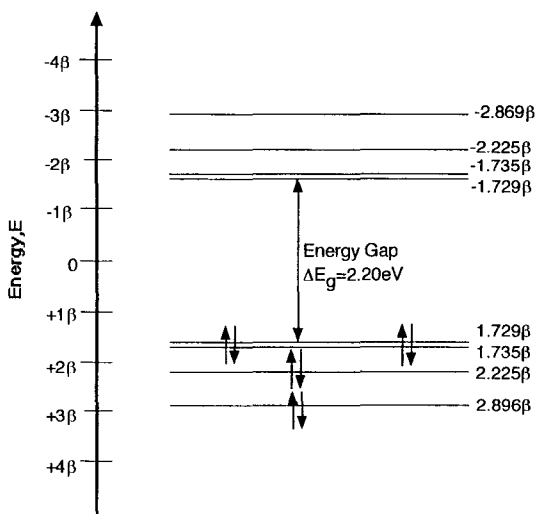


Fig. 17 Electron energy band structure of $\text{GaP}_{1-0.25}\text{N}_{0.25}$

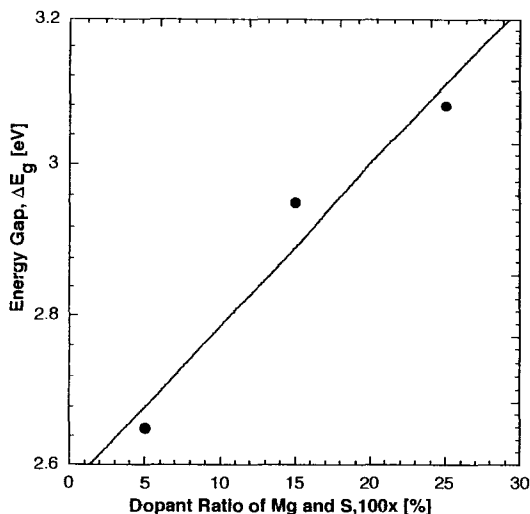


Fig. 18 Relation between energy gap ΔE_g and dopant ratio of Mg and S

2.65 eV となることがわかる。

以上より赤色，緑色および青色発光ダイオード素材としてそれぞれ GaAs ， $\text{GaP}_{1-0.125}\text{N}_{0.125}$ および $\text{Zn}_{1-0.05}\text{Mg}_{0.05}\text{Se}_{1-0.05}\text{S}_{0.05}$ を使用すればよいと結論できる。

II. 2. 2. 2 夜と昼を受容する光度1カンデラの電子ローソク灯の概念設計

本節では赤色，緑色および青色発光ダイオード素材 GaAs ， $\text{GaP}_{1-0.125}\text{N}_{0.125}$ および $\text{Zn}_{1-0.05}\text{Mg}_{0.05}\text{Se}_{1-0.05}\text{S}_{0.05}$ を用いて光度1カンデラの白色光を発光する電子ローソク灯について検討する。

光度1カンデラの白色光を発光させるには各原色発光ダイオードにそれぞれ $(67\sim 83) \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ を割り当て，同時に発光させる必要がある。

いま，発光ダイオードの発光部容積は pn 接合部の巾 b ，長さ h ，そして pn 接合部厚さ $\Delta \ell$ とすれば $bh\Delta \ell$ となる (Fig. 19)。ここで各原色発光ダイオードがそれぞれ $(67\sim 83) \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ を発光するに必要な発光ダイオードの発光部容積 $bh\Delta \ell$ は次のようになる。

赤色 (GaAs , $a = 5.6538\text{\AA}$)

$$bh\Delta \ell = \frac{(67\sim 83) [\text{J}\cdot\text{s}^{-1}] \times 10^6 [\Omega] \times 5.6538^2 \times (10^{-8})^2 [\text{cm}^2]}{0.912 [\text{V}] \times 1.98 [\text{V}]}$$

$$= (1.19\sim 1.47) \times 10^{-7} [\text{cm}^3] \quad (7)$$

緑色 ($\text{GaP}_{1-0.125}\text{N}_{0.125}$, $a = 5.4506\text{\AA}$)

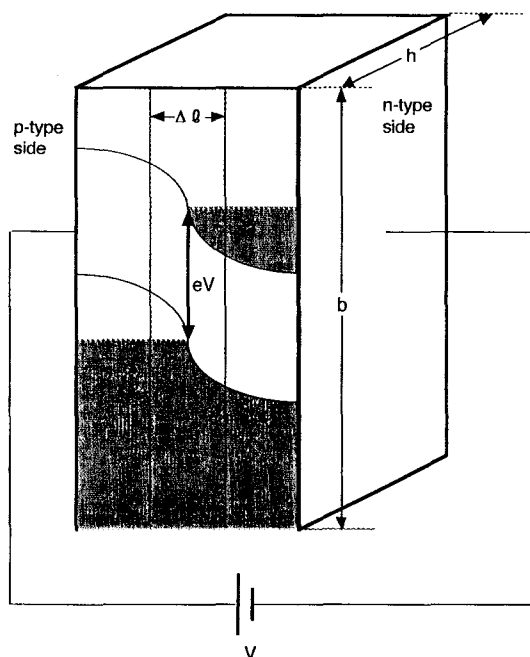


Fig. 19 The concept of light emitting volume in light emitting diode

$$bh\Delta\ell = \frac{(67\sim 83) [\text{Js}^{-1}] \times 10^6 [\Omega] \times 5.4506^2 \times (10^{-8})^2 [\text{cm}^2]}{0.912 [\text{V}] \times 2.23 [\text{V}]}$$

$$= (0.98\sim 1.21) \times 10^{-7} [\text{cm}^3] \quad (8)$$

青色 ($\text{Zn}_{1-0.05}\text{Mg}_{0.05}\text{Se}_{1-0.05}\text{S}_{0.05}$, $a = 5.66882 \text{ \AA}$)

$$bh\Delta\ell = \frac{(67\sim 83) [\text{Js}^{-1}] \times 10^6 [\Omega] \times 5.66882^2 \times (10^{-8})^2 [\text{cm}^2]}{0.912 [\text{V}] \times 2.65 [\text{V}]}$$

$$= (0.89\sim 1.10) \times 10^{-7} [\text{cm}^3] \quad (9)$$

ただし、いずれの発光ダイオード素材の抵抗率も $10^6 \Omega$ であり、外部注入電圧は 0.912V である。

式(7)から式(9)より各発光ダイオードの発光部面積 bh はそれぞれ次のようにもとまる。

赤色 (GaAs , $a = 5.6538 \text{ \AA}$)

$$bh = \frac{(1.19\sim 1.47) \times 10^{-7} [\text{cm}^3]}{5.6538 \times 10^{-8} \times 3 [\text{cm}]} \approx 0.79 [\text{cm}^2] \quad (10)$$

緑色 ($\text{GaP}_{1-0.125}\text{N}_{0.125}$, $a = 5.4506 \text{ \AA}$)

$$bh = \frac{(0.98\sim 1.21) \times 10^{-7} [\text{cm}^3]}{5.4506 \times 10^{-8} \times 3 [\text{cm}]} \approx 0.67 [\text{cm}^2] \quad (11)$$

青色 ($\text{Zn}_{1-0.05}\text{Mg}_{0.05}\text{Se}_{1-0.05}\text{S}_{0.05}$, $a = 5.66882 \text{ \AA}$)

$$bh = \frac{(0.89\sim 1.10) \times 10^{-7} [\text{cm}^3]}{5.66882 \times 10^{-8} \times 3 [\text{cm}]} \approx 0.59 [\text{cm}^2] \quad (12)$$

以上より光度1カンデラの白色光を発光するに必要な各原色発光ダイオードの発光部面積は 0.79cm^2 (赤色), 0.67cm^2 (緑色) および 0.59cm^2 (青色) であることがわかる。ただし、各原色発光ダイオードの発光部厚さ $\Delta\ell$ を格個定数の3倍としてもとめた。

したがって、発光部面積の総和 2.05cm^2 を赤色が 0.79cm^2 , 緑色が 0.67cm^2 , および青色が 0.59cm^2 になるように Fig. 20 の a) の区画で割り振り, b) のように片面に導電性透明電極を蒸着し, 他面に鏡面電極をメッキする。そして, Fig. 21 のように鏡面電極を内側に導電性透明電極を外側にして直径 1cm , 巾 0.65cm の白色灯とする。

II. 2. 3 夜と昼を受容する電子ローソク用水素・酸素発生触媒の素材設計学的考察

本節では昼の太陽光により水 (H_2O) を水素 (H_2)

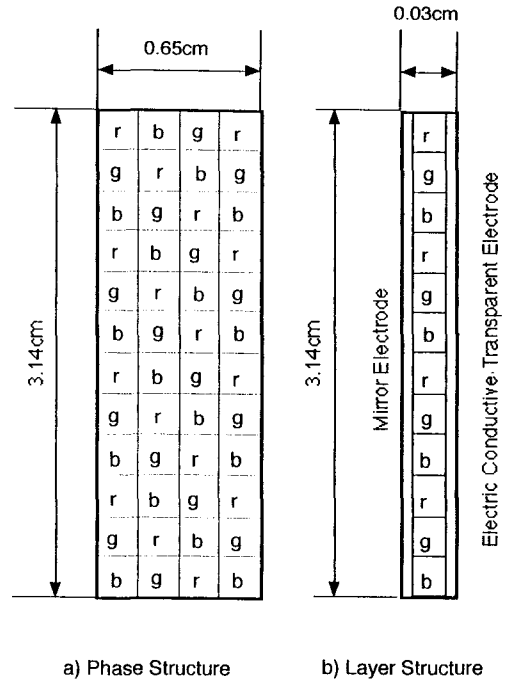


Fig. 20 Geometrical structure of three primary colours emitting diode (r: red, g: green, b: blue)

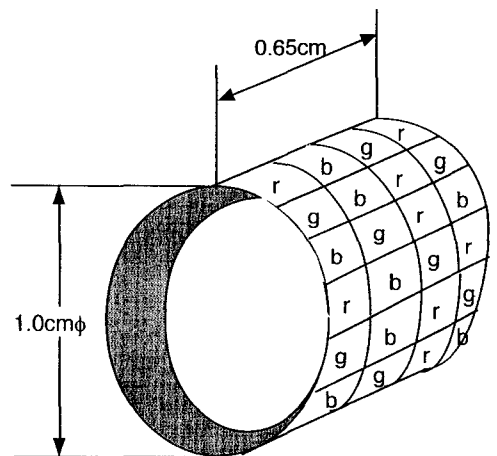


Fig. 21 Structure of white colour emitting light (r: red, g: green, b: blue)

と酸素 (O_2) に高効率で分解できる触媒を素材設計学的に検討する。そして、夜白色電子ローソクを点灯させるための水素燃料電池用燃料として使用する水素 H_2 と O_2 の捕獲システムを同時に提出する。

Fig. 22 には $SrTiO_3$ の, **Fig. 23** には Sr 位置に **Fig. 22** には Sr 位置に Pb を 12.5% ドープした $Sr_{0.875}Pb_{0.125}TiO_3$ の, および **Fig. 24** には Sr 位置に Ag を 25% ドープした $Sr_{0.75}Ag_{0.25}TiO_3$ の単位格子をそれぞれ示してある。それぞれに対して量子力学と群論を用いて電子エネルギー帯構造をもとめ, その結果を **Fig. 25** に示してある。これによれば $SrTiO_3$, $Sr_{0.875}Pb_{0.125}TiO_3$ および $Sr_{0.75}Ag_{0.25}TiO_3$ のエネルギーギャップ ΔE_g はそれぞれ 3.2 eV, 2.8 eV および 2.6 eV であることがわかる。そして, $SrTiO_3$ には深いアクセプター準位を有する p 型半導体に, $Sr_{0.875}Pb_{0.125}TiO_3$ はそのまま, そして $Sr_{0.75}Ag_{0.25}TiO_3$ を深いドナー準位を有する n 型半導体にして, この順で接合すれば **Fig. 26** のような電子エネルギー帯構造をうる。これによればこの電子エネルギー帯構造は

i) 価電子帯の最上部と伝導帯の最下部とのギャップ ΔE_g が水分解に必要な 1.23 eV より大きい。

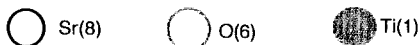
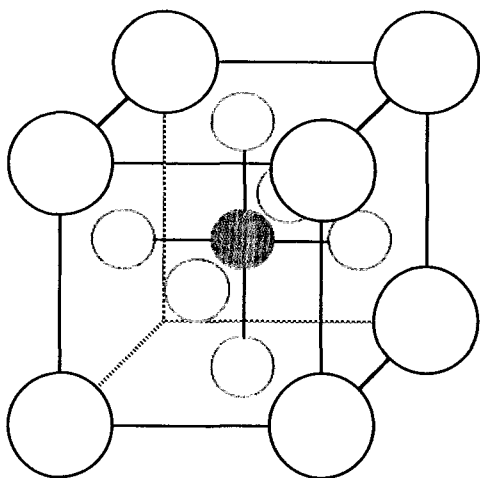


Fig. 22 Crystal structure of $SrTiO_3$

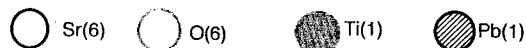
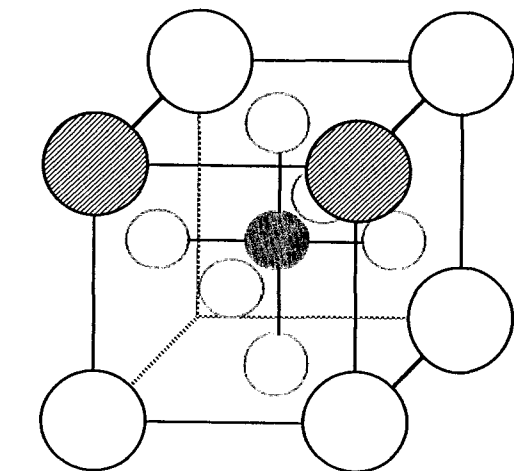


Fig. 23 Crystal structure of $Sr_{0.875}Pb_{0.125}TiO_3$

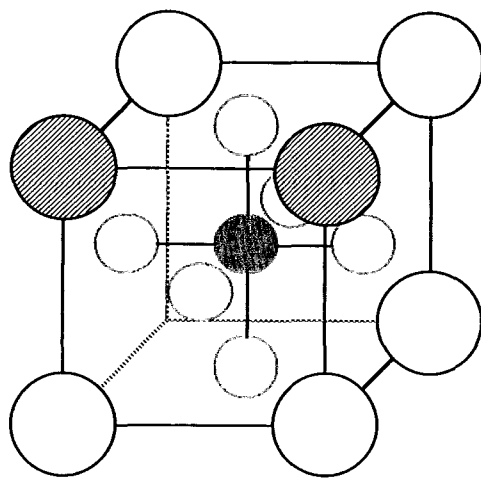


Fig. 24 Crystal structure of $Sr_{0.75}Ag_{0.25}TiO_3$

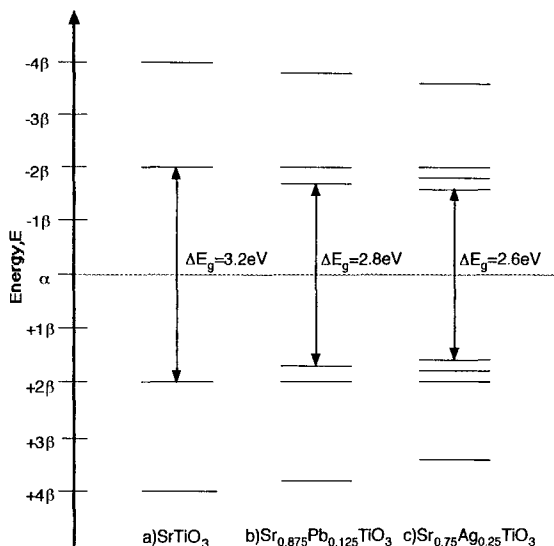


Fig. 25 Electron energy band structures of three mother materials necessary to design white colour emitting light

ii) n型側の伝導帯下端のエネルギー準位が水素発生エネルギー準位 E_{H_2} より上側に、そしてp型側の価電子帯上端のエネルギー準位が酸素発生エネルギー準位 E_{O_2} より下側に位置している。

の2の太陽光による水分解のための必要条件を満たしていることがわかる。

したがって、p型側で酸素 O_2 が、n型側で水素 H_2 が発生する。

さて、光度1カンデラを発光させるには § 2.2 からわかるように $(2 \sim 2.5) \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ すなわち $(1.25 \sim 1.56) \times 10^{22} \text{ eV} \cdot \text{s}^{-1}$ が必要である。

一方、地表での太陽エネルギーの照射密度速度は $6.24 \times 10^{17} \text{ [eV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ である。このなかから Fig. 28の電子エネルギー帯構造により 5.74 eV ($(3.2 + 2.8 + 2.6) / 3 \text{ eV}$) をとりこみ水を電解し、 H_2 と $\frac{1}{2} O_2$ を発生させることができる。そして、水素燃料電池として 1.824 eV (起電力エネルギー 0.912 eV の2倍) をつくりだす。

以上より夜2時間光度1カンデラを発光するために必要なエネルギーは次式となることがわかる。

$$(1.25 \sim 1.56) \times 10^{22} \text{ [eVs}^{-1}] \times 2 \times 3,600 \text{ [s]}$$

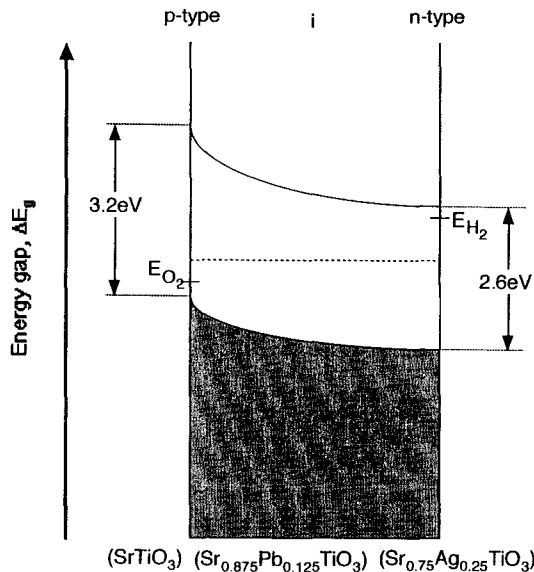


Fig. 26 Electron energy band structure of water decomposition catalyst

$$= (0.9 \sim 1.12) \times 10^{25} \text{ [eV]} \quad (13)$$

これより夜2時間光度1カンデラを発光させるに必要な水分解触媒接合面積 (Fig. 26の電子エネルギー帯構造を有する) A は次式よりもとめられる。

$$\begin{aligned} & (0.9 \sim 1.12) \times 10^{25} \text{ [eV]} \\ & = 2 \times 0.912 \text{ [eV]} \times \frac{6.24 \times 10^{17} \text{ [eVcm}^{-2}\text{s}^{-1}]}{5.74 \text{ [eV]}} \\ & \times 0.1 [-] \times A \text{ [cm}^2] \times 7 \text{ [hr]} \times 3,600 \text{ [s} \cdot \text{hr}^{-1}] \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、水分解効率を0.1とする。したがって、必要な水分解触媒接合面積 A は次式となる。

$$\therefore A = (1.79 \sim 2.24) \times 10^4 \text{ [cm}^2] \quad (15)$$

式(15)は光度1カンデラを夜2時間発光するために必要な水分解触媒接合面積 A はほぼ 140 cm の正方形となることを意味している。

以上より、昼7時間太陽光の照射をうけて夜2時間光度1カンデラを発光させる電子ローソクの構成とディメンションは Fig. 27のようになる。これによれば電子ローソクは水素燃料電池 ($5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$),

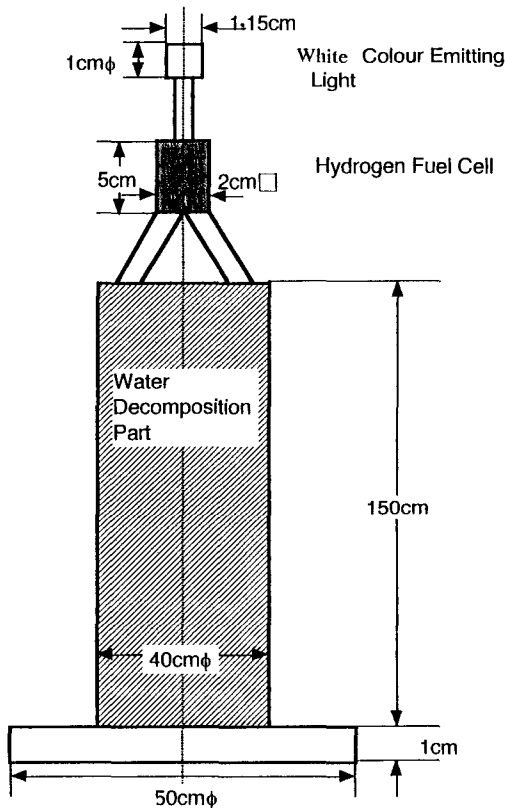


Fig. 27 The dimension and arrangement of "electric candle"

白色発光ダイオード灯 ($1.0\text{ cm}^{\circ} \times 0.65\text{ cm}$), および太陽光による水分分解部 ($40\text{ cm}^{\circ} \times 150\text{ cm}$ 円筒形) からなっていることがわかる。

しかし、夜を夜として、昼は昼として自然の仕組みをあるがままに受容する文明を構築する照明技術として電子ローソク概念を提出した。これによればかりに4人家族がそれぞれ夜2時間1カンデラの光度を享受するとすれば、太陽光エネルギー取入れ面積 8 m^2 を必要とする。今後さらなる性能向上による小型化が期待できるものと考えられる。

本報で提案した電子ローソク概念は原理的に実現可能であり、将来の素材文明における白色灯の原形を示唆しているものと指摘できる。

Ⅲ. 結言

本報では、現代素材文明における新しい灯火の概念を模索するために、夜と昼を受容する種々の近代以前の素材文明における灯火について素材文化学的に考察した。そして、その知見にもとづいて現代素材文明における新しい灯火として夜と昼を受容する電子ローソク概念を提出し、その可能性を検討した。その結果得られた主な結論は以下の通りである。

i) 夜と夜を受容する近代以前の種々の素材文明における灯火素材はいずれも自然再生的かつ素材消費量をむやみに増大させない仕組みを満たしている。

ii) 夜と昼を受容する電子ローソクは太陽光と水のみをエネルギー源として構成され、i) の条件を満たしている。

iii) 夜と昼を受容する電子ローソクは太陽光による水電解部、水素燃料電池、および白色ダイオード灯からなる。

iv) 太陽光による水電解部の触媒は $\text{SrTiO}_3\text{Sr}_{0.075}\text{Pb}_{0.125}\text{TiO}_3$, および $\text{Sr}_{0.75}\text{Ag}_{0.25}\text{TiO}_3$ の3種類であり、素子構造は3種類からなる接合 (pin 接合) である。

v) 水素燃料電池の常温作動固体電解質として厚さ $3\sim 6\ \mu$ の薄膜状の $\text{Zr}_{1-y-z}\text{Ca}_y\text{Ge}_z\text{O}_{2-y}$ ($y = 0.2\sim 0.3$, $z = 0.18\sim 0.20$) が使用できる。

vi) 白色発光ダイオード灯は GaAs (赤色), $\text{GaP}_{1-0.25}\text{N}_{0.25}$ (緑色), および $\text{Zn}_{1-0.05}\text{Mg}_{0.05}\text{Se}_{1-0.05}\text{S}_{0.05}$ を用いることにより可能である。

vii) 昼7時間太陽光の照射をうけ、夜2時間光度1カンデラの白色光を発光させるに必要な各部のおおよそのディメンションは水素燃料電池が $5\text{ cm} \times 2\text{ cm}$, 白色発光ダイオード灯が $1.0\text{ cm}^{\circ} \times 0.65\text{ cm}$, および太陽光による水電解部が $40\text{ cm}^{\circ} \times 150\text{ cm}$ (円筒形) 程度である。

viii) 本報で提案した電子ローソク概念は原理的に実現可能であり、将来の素材文明における白色灯の原形を示唆しているものと考えられる。

引用文献

- 1) 尾本, 本城; "照明電熱", p.14 (共立出版, 1978)
- 2) 電気学会編; "照明工学", p.79 (学献社, 1978)

- 3) 前出 1); p.17 (共立出版, 1978)
- 4) 前出 2); p.42 (学献社, 1978)
- 5) 前出 1); p.59 (共立出版, 1978)
- 6) 前出 2); p.81 (学献社, 1978)
- 7) 前出 1); p.66 (共立出版, 1978)
- 8) 前出 2); p.92 (学献社, 1978)
- 9) 世界大百科事典, **29**—261 (平凡社, 1993)
- 10) 牧野; “現代素材文明のパラダイムに関する構造主義的考察—前近代から近代まで”, 素材物性学雑誌, **9** [2], 1—17 (1996)
- 11) 竹原; 電池, p.173 (大日本図書, 1992) または吉沢; 電池, p.205 (講談社, 1986)
- 12) 牧野; “エレクトロセラミクス素材物性学”, p.111 (日刊工業新聞社, 1992)
- 13) 牧野; “エレクトロセラミクス素材設計学”, p.136 (日刊工業新聞社, 1993)