

パライバおよびその他銅含有トルマリンに関する調査資料

日本語訳

エチオピア・アブロー産トルマリン

パライバおよびその他の銅含有トルマリンに関する初期検査 (エチオピア・アブロー産)

2026年6月24日から26日にかけて、エチオピア・小呂美亜集亜ブロー村付近で数週間前に報告された新発見の産地からバンコクに到着したばかりのトルマリン原石 21 点を対象に、予備調査が実施された。この調査は VP Consulting WLL が、C. Dunaigre Consulting GmbH およびフランス宝石学研究所 (Laboratoire Français de Gemmologie、LFG) と共同で実施したものである。これら 21 点のうち 10 点は非常に高品質で価値の高い宝石であった。素材の透明度を確認するため、所有者によって 1 点がその場でファセットカット (研磨) された (下の写真参照)。

これらの石が持つ印象的な青～緑色の発色要因を調べるため、EDXRF (エネルギー分散型蛍光 X 線分析) および UV-Vis 分光法 (紫外可視分光法) を用いた化学分析・分光分析が行われた。これらのエルバイト (リチア電気石) 系トルマリンの大半は、実際に発色に寄与する高濃度の銅を含有していた。しかし、ブラジル産の古典的な銅含有トルマリンとは異なり、多くの試料は中～高濃度の鉄も含んでおり、これも発色に強く寄与している。さらに、マンガンも量にばらつきはあるものの検出された。



エチオピア紙幣「100 ブル」の上に置かれた、青～緑色のトルマリン原石群。黒色の結晶を含む複数のラフストーンと、研磨済みの 1 石が確認できる。撮影：ヴィンセント・パルデュー。(Page 01)

これらの予備的な結果は、いくつかの点で興味深い。

本調査における最も重要な発見は、銅・鉄・マンガンの含有量に見られる著しい化学的多様性であり、これらの濃度は個々の標本ごとに大きく異なっていた。このことは、アブロー鉱床が均一な素材ではなく、化学組成の異なる多様なトルマリン群を産出していることを示唆している。さらに、分析した試料はいずれもガリウム、亜鉛、鉛、ビスマスの含有量が比較的高い値を示した。これらの微量元素は、アブロー産トルマリンを他産地の銅含有トルマリンと区別するための有用な指標となる可能性がある。

こうした化学的・分光学的な多様性は、宝石の分類において重要な意味を持つ。銅が明らかに主たる発色因子（クロモフォア）となっている石は、LMHC 情報シート第 6 号（付属資料参照）の用語定義に従い、パライバトルマリンに該当すると考えられる。その意味で、この予備的な結果は、エチオピアで新たなパライバトルマリン鉱床が実際に発見されたという見方を裏付けるものである。一方、鉄を高濃度に含む標本は発色の多くを銅ではなく鉄に由来しており、通常はパライバトルマリンとはみなされず、むしろナミビアやアフガニスタン産のものと同様のインジコライト（業界では「ラグーン」トルマリンと呼ばれることが多い）に分類される。それ以外の石は中間的な組成範囲にあり、分類については解釈の余地が残る。

これは、SSEF が最近発表したプレスリリースで示唆されていた仮説——この新鉱床の素材は「特にブラジルをはじめとする既知の産地の素材と非常によく似ている」とする見解——を裏付けるものではないようである。実際、私たちが調査した石の大半の化学組成は、ブラジル・パライバ州産の古典的な銅含有トルマリンよりも、Krzemnicki et al. (2022 年、付属資料参照) が報告したナイジェリア産とされる Fe-Cu 型（鉄・銅複合型）トルマリンや、他の論文 (<https://www.mdpi.com/2075-163X/14/1/44>、付属資料参照) で紹介されている一部の石との組成の方が近いように見受けられる。

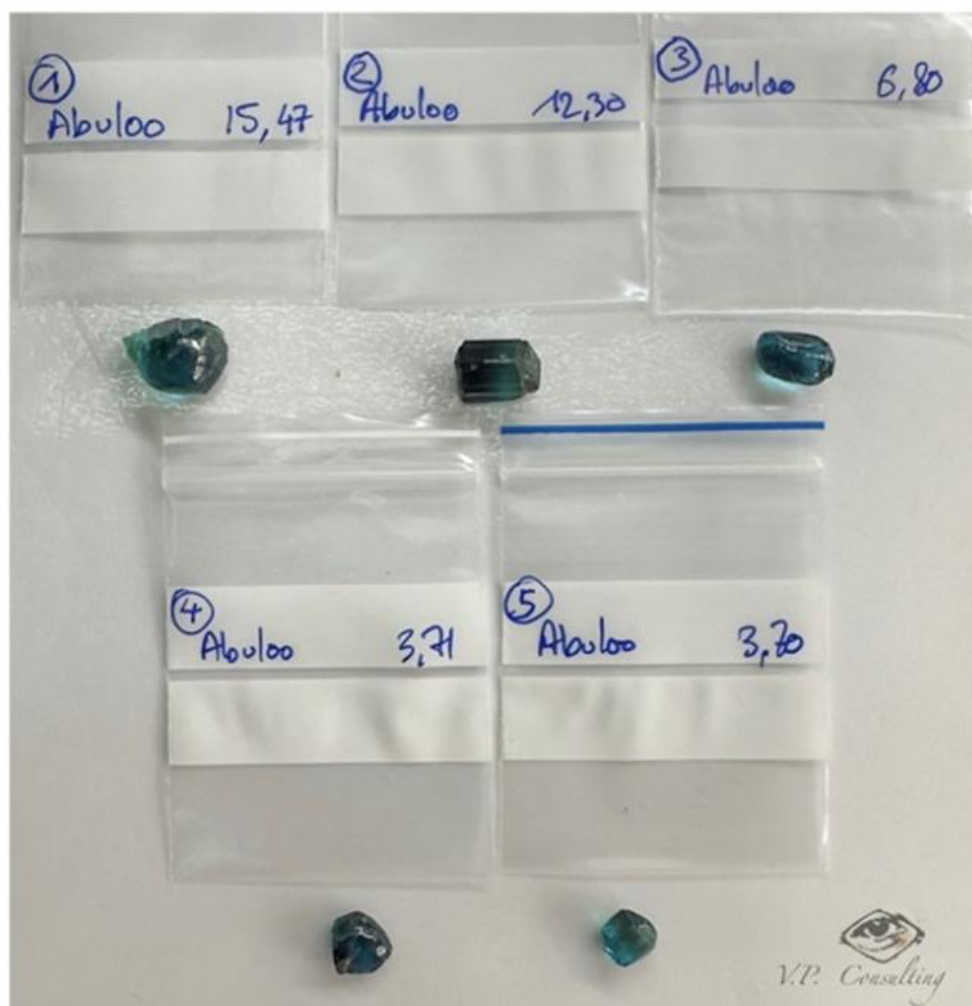


前ページと同じ、エチオピア・アブロー地域産と報告されているトルマリンの一群。同じ自然光の下、異なる背景で撮影したもの。素材の透明度を確認するため、そのうち1石がファセットカットされている。研磨されたその石は1カラットをわずかに超える重量で、銅含有量が高く、鉄含有量は比較的低い。撮影：ヴィンセント・パルデュー。

これらの観察結果は、見た目の印象だけでは分類の判断材料として不十分であることを示している。パライバトルマリンとインディコライトを確実に識別するには、定量的な化学分析に加え、UV-Vis-NIR 分光法（LMHC 情報シート第 6 号で説明されている手法）を用いて、発色に対する銅と鉄それぞれの寄与度を明らかにする必要がある。

分析した試料の間でマンガン含有量に大きなばらつきが見られたことは、これらの石が加熱処理に対して示す反応にも個体差が大きい可能性を示唆している。マンガン含有量が比較的低い石は、通常の加熱処理を行ってもほとんど、あるいはまったく改善が見られない場合がある一方、マンガン含有量が高い石はより反応しやすく、より顕著な色調の変化を示す可能性がある。

個々の標本によって化学組成が大きく異なるため、アブロー産トルマリンすべてに共通する単一の加熱処理挙動を想定すべきではない。化学組成と処理反応との関係を明らかにするためには、代表的な試料群を対象とした管理された実験的研究が必要となるだろう。



本予備調査のため、2026 年 6 月 26 日にバンコクで確認・調査された、最大サイズの 5 点の詳細（写真の袋にはそれぞれ「①Abuloo 15.47」「②Abuloo 12.30」「③Abuloo 6.80」「④Abuloo 3.71」「⑤Abuloo 3.70」と手書きされている。カンマは原文の小数点表記。単位はカラットと推定される）。このうち銅によって明確に発色していると判定され、LMHC 情報シート第 6 号が提案する用語定義に基づきパライバに該当すると認められたのは 3 点のみであった。撮影：ヴィンセント・パルデュー。（Page 03）

結論

アブローにおける銅含有エルバイト（リチア電気石）系トルマリンの発見は、世界的に増加しつつある既知の銅含有トルマリン鉱床のリストに加わる、重要な発見である。

最初の分析結果は、アブロー鉱床が化学的に不均質な銅含有トルマリン群を産出していることを示している。したがって、この鉱床から産出する石のすべてを自動的に「パライバ」と呼ぶべきではない。銅が主たる発色因子となっている標本については、明らかにこの呼称に該当する。一方、より中間的な組成範囲にあり分類が議論の余地を残す標本もあれば、鉄を豊富に含み発色の多くを鉄に由来する石については、インディコライトと呼ぶ方が適切である。

この同じ化学的多様性は、個々の石が加熱処理に示す反応にも影響を及ぼすと考えられ、マンガン含有量が少ない標本は、マンガン含有量が高い標本に比べて改善効果が小さいと予想される。

信頼性の高い原産地判定基準を確立し、この鉱床が持つ組成的多様性への理解を深め、世界の銅含有トルマリン産地の中でのその重要性を評価するためには、今後、統計的にも代表性のある、より大規模で信頼できる試料群を対象とした、鉱物学的・分光学的・地球化学的なさらなる調査が必要である。試料は理想的には、資格を持つフィールド宝石学者が採掘現場に赴き、採掘の様子を実際に確認した上で現地で収集されることが望ましい。

著者：ヴィンセント・パルデュー（VP Consulting WLL）、クリスチャン・デュネーグル（C. Dunaigre Consulting GmbH）、オレリアン・ドロネー（LFG - フランス宝石学研究所）、ステファノス・カランペラス博士（LFG、およびギリシャ・テッサロニキ大学）



本予備調査のため 2026 年 6 月 26 日にバンコクで調査された、エチオピア・アブロー産と報告されているトルマリン 21 点の集合写真。撮影：ヴィンセント・パルデュー。（Page 04）

付属資料①：LMHC 情報シート第 6 号「パライバトルマリン」（要旨）

以下は、Laboratory Manual Harmonisation Committee（LMHC、鑑別書用語統一委員会）公式資料「LMHC Standardised Gemmological Report Wording」version 8（2023 年 2 月）情報シート第 6 号の要旨訳です。鑑別書に正式な文言として記載する際は、LMHC 公式サイトの原文をご確認ください。

LMHC 加盟の宝石鑑別機関は、パライバトルマリンの鑑別書に用いる名称を統一している。

定義

パライバトルマリンとは、産地を問わず、銅(Cu)およびマンガン(Mn)の存在を主因として、ミディアムライト～ハイの彩度・トーンを示す、ブルー（エレクトリックブルー、ネオンブルー、バイオレットブルー）、青みを帯びたグリーン～緑みを帯びたブルー、グリーン、または黄みを帯びたグリーンのトルマリンを指す。「パライバ」という品種名は、この宝石が最初に採掘されたブラジルの産地名に由来する。

- ・ 銅をわずかに含むにとどまり彩度が低い、あるいは上記の色域から外れるトルマリンは、パライバトルマリンとは呼ばれない。
- ・ 鉄含有量が高い銅含有トルマリンで、UV-Vis-NIR 分光計による o 線偏光スペクトルにおいて 700nm の吸収帯が 900nm の吸収帯（銅に関連）よりも強く現れるものは、パライバトルマリンとは呼ばれない。

鑑別書での記載方法（要旨）

鑑別書には、識別（トルマリン）、種（天然トルマリン）、変種（色＋パライバ＋トルマリン）、産地（未確定／不明／ブラジル／ナイジェリア／モザンビーク／その他）を記載する。産地を確定できない場合は「地理的原産地は確定されていない」旨を備考欄に記載する。パライバは銅・マンガンを含むトルマリンの品種であり、名称はブラジルの産地名に由来するが、現在は複数の産地から産出することも備考として説明される。また、パライバトルマリンは一般に加熱処理が施されているが、場合によっては処理の有無を判別できないこともある

（情報シート第 8 号も参照）。

付属資料②：The Journal of Gemmology 38(1), 2022「Gem Notes」より（要旨訳）

以下は、The Journal of Gemmology, 38(1), 2022, pp.20-21 に掲載された、Dr. Michael S. Krzemnicki・Dr. Hao A. O. Wang（スイス宝石学研究所 SSEF）による記事「Paraiba or Not? Cu-bearing Tourmaline with a Distinct Fe Concentration」の要旨訳です。同誌は学術誌であるため、記事本文および図表の全文転載は行わず、内容の要点をまとめています。正確な記述が必要な場合は原典をご参照ください。

パライバか否か？—特徴的な鉄濃度を示す銅含有トルマリン

銅含有トルマリン（通称パライバ型）は、そのビビッドな発色——最良のものは「ネオン」あるいは「エレクトリック」ブルーと称される——により、カラーストーン市場で最も人気の高い宝石の一つである。既知の産地にはブラジル（パライバ州、リオグランデ・ノルテ州）、モザンビーク、ナイジェリアなどがある。興味深いことに、 Fe^{2+} を発色因子とする銅を含まないインジコライトの中にも、パライバ型によく似た緑みを帯びたブルーを示すものがあり（業界では「ラグーン・トルマリン」と呼ばれ、ナミビアやアフガニスタン産などが知られる）、両者は通常、化学分析や UV-Vis 吸収分光法によって識別できる。

本記事では、SEEF に持ち込まれた 61 カラットの大型で高い透明度を持つ緑みを帯びたブルーの中間的なトルマリン（試料 B）を、ナイジェリア産とされる類似色の銅含有トルマリン（試料 A、19ct）、および銅を含まないナミビア産インジコライト（試料 C、23ct）と比較している。



Figure 26：本調査で比較検討された、類似した緑みを帯びたブルーの3点のトルマリン（左からナイジェリア産の銅含有パライバ型トルマリン [試料 A、19ct、Cu/Fe 比 18]、ナイジェリア産と推定される中間組成のトルマリン [試料 B、61ct、Cu/Fe 比 0.16]、ナミビア産の鉄含有インジコライト [試料 C、23ct、Cu/Fe 比 0.000025]）。合成写真：M. S. Krzemnicki（© SSEF）。

LA-ICP-TOF-MS（レーザーアブレーション誘導結合プラズマ飛行時間型質量分析法）による分析で得られた、3 試料の鉄・銅含有量は以下の通りである（Table I）。

元素	試料 A（銅含有）	試料 B（鉄・銅複合）	試料 C（鉄含有）
Fe (ppm)	113	4181	6194
Cu (ppm)	2037	670	0.16
Cu/Fe 比	18	0.16	0.000025

UV-Vis-NIR スペクトル上でも 3 試料は明確に区別される。試料 A は銅由来の 900nm 吸収帯が 700nm 吸収帯より卓越し、試料 C は鉄由来の約 720nm 吸収帯を単独で示す。試料 B は 700nm と 900nm の吸収強度がほぼ等しく、銅と鉄の複合発色であることを示している。

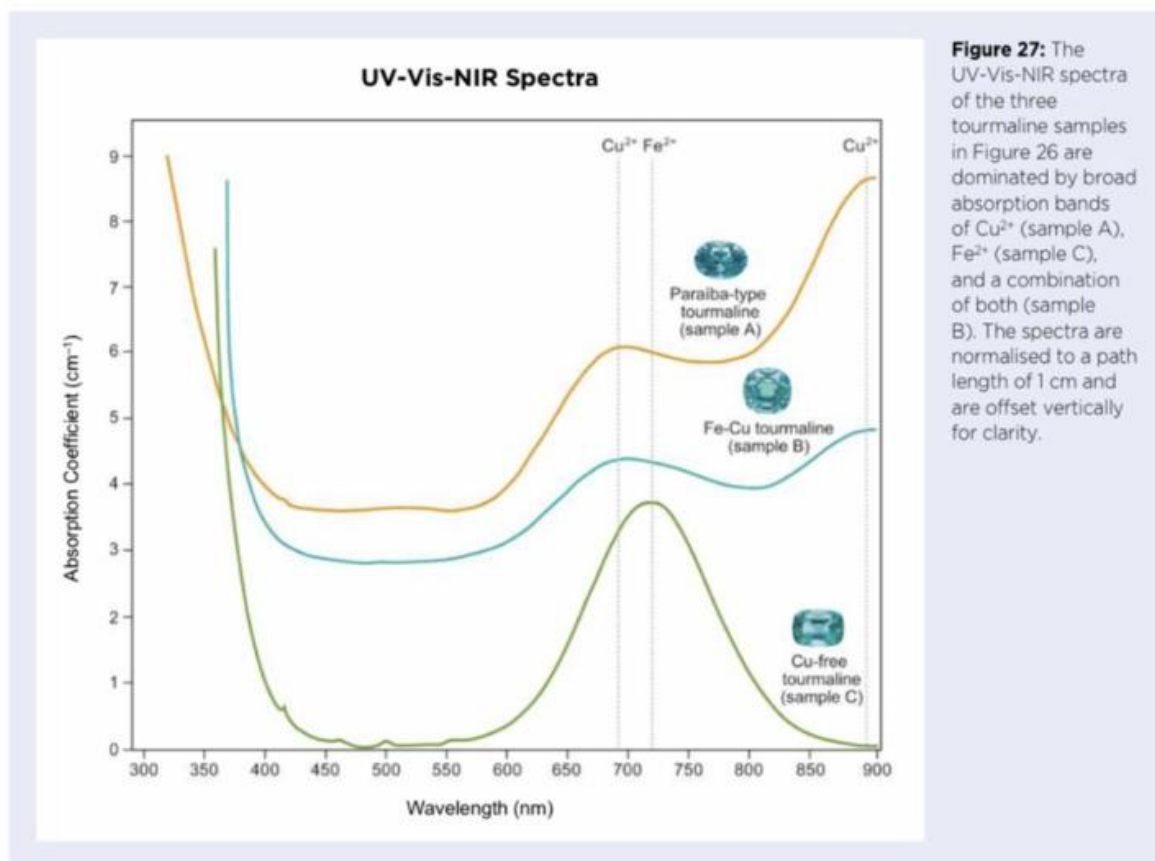


Figure 27 : Figure 26 の 3 試料の UV-Vis-NIR スペクトル。 Cu^{2+} (試料 A)、 Fe^{2+} (試料 C)、およびその複合 (試料 B) による幅広い吸収帯が特徴的に現れている。

機械学習 (t-SNE : t 分布型確率的近傍埋め込み法) による微量元素データの統計処理では、試料 B の原産地はナイジェリアである可能性が最も高いとされているが、鉱山現場での独立した確認はまだ得られていない。

著者らは、試料 B のような、パライバ型としては典型的でない、比較的高い鉄濃度を示す緑みを帯びたブルーのトルマリンが近年増えていることを受け、Fe-Cu 含有トルマリンをどの程度まで「パライバ」という名称で呼ぶことができ、どの時点から低濃度の銅を含むインジコライトトルマリンと呼ぶべきかという命名法上の課題について、現在も継続して研究していると述べている。

執筆者 : Dr. Michael S. Krzemnicki FGA、Dr. Hao A. O. Wang FGA (スイス宝石学研究所 SSEF、スイス・バーゼル) 出典 : The Journal of Gemmology, 38(1), 2022, pp.20-21

参考文献 (記事末尾に掲載) : Abduriyim et al. 2006 (Gems & Gemology 42(1)) / Fritsch et al. 1990 (Gems & Gemology 26(3)) / Krzemnicki 2021 (Facette Magazine No.27) / Laurs et al. 2008 (Gems & Gemology 44(1)) / LMHC 2012 (Information Sheet #6) / Merkel & Breeding 2009 (Gems & Gemology 45(2)) / Smith et al. 2001 (Gems & Gemology 37(3)) / Wang & Krzemnicki 2021 (Journal of Analytical Atomic Spectrometry 36(3)) / Wang et al. 2016 (Journal of Gemmology 35(3))。詳細な書誌情報は原典をご参照ください。

付属資料③：The Journal of Gemmology 38(1), 2022 「PEARLS」欄より (Page 22)

以下は、付属資料②と同じ The Journal of Gemmology 38(1), 2022 の Page 22 に掲載されている、真珠に関する別記事「Art Nouveau Pendant with a Large Blister Pearl」の訳です。パライバトルマリンとは主題が異なる、同誌同号内の別の Gem Notes ですが、ご要望によりこちらに収録しています。なお、いただいた画像はこの記事の冒頭部分（本文途中）までであるため、記事の続き（Page 22 の後半以降）は本資料には含まれていません。

アールヌーヴォー様式の大型ブリスターパールを用いたペンダント

天然真珠は、昔も今も稀少なものである。中でも特に上質な天然真珠は高く評価され、オークションでは最高値がつくこともある。天然真珠の中には貝殻に付着した状態で見つかるものがあり、その場合は貝殻から切り出し、貝殻側の面を多少加工する必要がある。これらは「ブリスターパール」として知られており（CIBJO 2021）、通常は真円の天然真珠ほど高く評価されないが、それでも稀少である（Zhou et al. 2017）。

ブリスターパールに外見が似たものとして、養殖ブリスターパールがある。これらは半球状の真珠で、貝の内側の殻表面で養殖される。通常、真珠母貝から作られた小さな核が貝殻に取り付けられ、通常 2～3 年ほどの期間をかけて真珠層が蓄積されるのを待つ。養殖ブリスターパールは天然ブリスターパールに比べて価値が低く、これは養殖の真円真珠と天然の真円真珠との価格差と同様の関係にある（Hänni 2012、および同論文中の参考文献）。

最近、ある金細工職人が、真珠を留めたペンダントを、鑑別のため DDI 財団ドイツダイヤモンド研究所（German Diamond Institute）に提出した（Figure 28a）。このペンダントには、繊細な
.....

※原文はここで途切れています（アップロードいただいた画像がこの文の途中までしか含まれていないため）。続きの文章が必要な場合は、該当ページの画像を追加でアップロードしてください。



Figure 28: (a) 鑑別のために提出された、卵型のブリスターパール（幅 17mm）をあしらったこのペンダント。(b) ペンダントの側面図。繊細なアールヌーヴォー様式の金細工と、真珠の縁の一部がマウント（留め具）に覆われている様子が分かる。(c) ペンダントの裏側（開いた状態）には、真珠の輪郭に沿った同心円状のリングが見られる。

撮影：T. Jordi、L. Kiefert。

付属資料④：Minerals 誌（MDPI, 2024, 14, 44）論文抄訳

以下は、オープンアクセス誌 Minerals（MDPI、CC BY 4.0 ライセンス）に掲載された論文「Identification of Some Gem Quality Blue to Green Li-Tourmalines」（Pasetti, Borromeo, Bersani, Andò, Schnellrath, Hennebois, Karampelas 著）の要旨・序論部分の抄訳です。

宝石品質のブルー～グリーン Li（リチウム）トルマリンの鑑別

著者：Lorenzo Pasetti、Laura Borromeo、Danilo Bersani、Sergio Andò、Jurgen Schnellrath、Ugo Hennebois、Stefanos Karampelas

要旨

魅力的な色調を持つ宝石品質のトルマリンのうち、パライバ型として知られる銅(Cu)・マンガン(Mn)含有のブルー～グリーンのリチウムトルマリンは、1980年代末の発見以来、大きな注目を集めてきた。パライバ型の大半はエルバイト種であるが、リディコータイト種の宝石も見られる。本研究では、エルバイトとリディコータイトという 2 つのトルマリン種を結晶方位によらず識別するためのラマン分光法の応用可能性を、EDXRF・UV-Vis-NIR・PL（フォトルミネセンス）分光法による化学分析と組み合わせて検討した。結果、OH伸縮振動領域のラマン分光が両種の識別に有効であり、この識別は結晶方位によらず一貫していることが分かった。一方、フィンガープリント領域は結晶方位に依存し、特定の方位で検出した場合にのみ両種を識別できる。さらに、パライバ型トルマリンは可視～近赤外(Vis-NIR)分光法により識別可能だが、ラマン分光法では識別できないことが示された。

序論（背景）

トルマリンは複雑な化学組成を持つホウケイ酸塩鉱物のスーパーグループであり、一般式 $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$ で表される。各結晶サイト（X・Y・Z・T・B・V・W）には、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Li^+ 、 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 V^{3+} 、 Si^{4+} 、 B^{3+} 、 $(OH)^-$ 、 O^{2-} 、 F^- など、さまざまなイオンが入り得る。宝石用トルマリンは、 $Fe^{2+} \cdot Fe^{3+} \cdot Mn^{2+} \cdot Mn^{3+} \cdot Ti^{4+} \cdot Cu^{2+} \cdot V^{3+} \cdot Cr^{3+}$ といった遷移元素や、放射線に由来する色中心により多彩な発色を示すことから注目されており、中でもブルー～グリーンのトルマリンは特に関心を集めている（以下、本文へ続く）。

本論文は CC BY 4.0 ライセンスの下で公開されており、著者・出典を明示した上での引用・転載が許可されます（出典：Pasetti et al., Minerals 2024, 14, 44, <https://doi.org/10.3390/min14010044>）。