

＜業界レポート＞ 世界りん資源の分布と開発

(2023年8月25日作成)

りん(P)は窒素(N)、加里(K)と並び、作物の生育に必要な三大元素の一つである。欠乏すると植物の成熟が遅れ、収量が減少する。最新のデータでは肥料としての世界のりん消費量は5,000万トン P_2O_5 に達した。図1は2018/19～2021/22肥料年度の世界窒素、りん酸(P_2O_5)と加里(K_2O)肥料の消費量を示す。

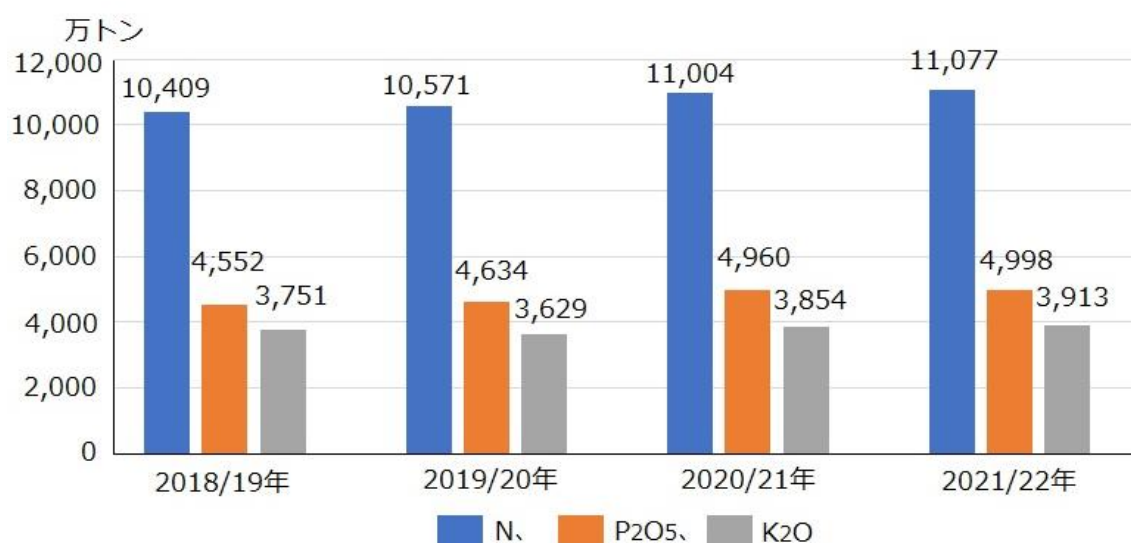


図1. 2018～2022肥料年度の世界窒素、りん酸、加里肥料消費量
(データ出所：IFA)

また、りんは動物骨格の形成、エネルギーの生成と調節、細胞機能の維持などに於いても重要な役割を果たしている。世界で生産されたりん酸塩化合物の約10%は動物用飼料添加物である。

また、りん酸塩総需要量の約5%は、洗剤、食品および飲料の添加物、水処理、歯磨き粉の製造などさまざまな産業用途に使われている。

最近では、電気自動車(EV)への移行により、高エネルギー密度を備えた低コストのバッテリーの開発が進んでいる。バッテリーの主流はリチウムイオン電池であるが、りん酸鉄リチウム(LFP、 $LiFePO_4$)が長いライフサイクルと相対的な熱安定性が優れているため、バッテリーの正極材料として、その使用が急速に普及されている。

一、りん資源の種類とその形成

りんは地殻に於ける存在量が多く、地殻を構成する元素の中にもりんの重量比では11番目、地殻の約0.13%を占める。自然界にはりんを含む天然鉱物が約100種あるが、存在量が少

ないとかりんの含有量が低いとかなどの理由で、ほとんどの鉱物はりん資源として利用することができない。りん酸やりん酸肥料の原料に適する鉱物はりん酸カルシウム塩の鉱物類に限られる。

典型なりん鉱物はフッ素りん灰石 (fluorapatite) で、その構造式は $(\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot \text{F}_2)$ で、純粋のフッ素りん灰石は P_2O_5 42.26%、 CaO 55.56%、 F 3.77%である。しかし、フッ素りん灰石の結晶構造中に F^- 、 Ca^{2+} 、 PO_4^{3-} イオンはその結晶化学半径に近いほかのイオンとの間に置換作用を起こし、別のりん酸塩鉱物に変化することが多い。例えば、 F^- は Cl^- 又は OH^- に置換され、塩化りん灰石 ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot \text{Cl}_2$) 又は水酸化りん灰石 (ハイドロキシアパタイト、 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot (\text{OH})_2$) となり、 Ca^{2+} は Na^+ 、 K^+ 又は Sr^{2+} に置換され、 PO_4^{3-} は AsO_4^{3-} 、 SiO_4^{3-} 、 SO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 又は CO_3^{2-} に置換されることで別のりん酸塩鉱物になる。概して、結晶構造中に置換された CO_3^{2-} が増えれば増えるほど、鉱物の屈折率が低くなり、結晶結合が緩くなり、隙間が多くなり、クエン酸に溶けるいわゆるく溶性りん酸分が多くなる。

りん酸カルシウム塩類の鉱床は主に3つの形態がある。海洋堆積岩系りん酸塩、火成岩と変質岩系りん酸塩、海鳥またはコウモリの糞から形成されるグアノである。

堆積岩系りん酸塩鉱床は一般に黒色頁岩と関連しており、りん鉱石は結晶が細かく、結晶の結合が緩く、 CO_3^{2-} 等に置換された場合が多く、分解しやすいため、肥料原料としての利用価値が高い。大型鉱床がほとんどで、資源量が多く、品質も良いので、世界のりん鉱石採掘量の約75%はこの堆積岩系りん鉱床から採掘されたものである。

火成岩にあるりん酸塩鉱床は、通常、カーボナタイト、霞石閃長岩、その他のアルカリ岩に貫入して形成されたものである。火成岩のりん酸塩鉱床は長年にわたって地下熱水の化学的および物理的プロセスによって、変質岩に変化された鉱床は変質岩系りん酸塩鉱床となる。火成岩と変質岩系りん酸塩鉱床はほとんど中小鉱床で、鉱石は大体結晶格子が大きく、構造が細密で、分解しにくいいため、肥料原料としての利用価値がやや低いが、選鉱性が良く、選鉱された精鉱の品質もよい。世界のりん鉱石採掘量の約23%を占める。

海鳥またはコウモリの糞から形成されたグアノは基本的に太平洋の島々に存在して、りんのほか窒素も含まれている。りん酸含有量が高く、結晶されていないか結晶不完全で分解しやすいので、そのまま粉砕して、りん肥として使える。但し、20世紀に過度の採掘により資源量が急減し、現在その採掘量が極わずか(2%程度未満)である。

りん鉱床の形成状態はその資源量と品質をほぼ決定する。概して、資源量としては、堆積岩>火成岩>グアノである。一方、りん鉱石の品質としての P_2O_5 含有量は、グアノ>堆積岩>火成岩だが、選鉱を行う場合は逆に火成岩>堆積岩である。りん鉱石を採掘して肥料に加工する際に、その資源の存在形態は生産コストを決定する最重要な要素である。

二、世界のりん資源の分布と埋蔵量

2017年の時点で確認された地球上のりん鉱床の分布は図2に示す。ただし、りんは金属元素ではないため、磁力線や赤外線に反応せず、その鉱床を衛星などによるリモートセンシング探索が不可能である。また、石油や天然ガスのように人工的に起こした弾性波を利用して地下構造を調べる技術（地震波探索）も応用しにくい。りん鉱床の発見は大体地質資料からりん鉱石が生成できそうな堆積岩や火成岩の存在地形を確認し、現地で実地調査する。地球上のりん資源がまだ全貌が掴まっていない。

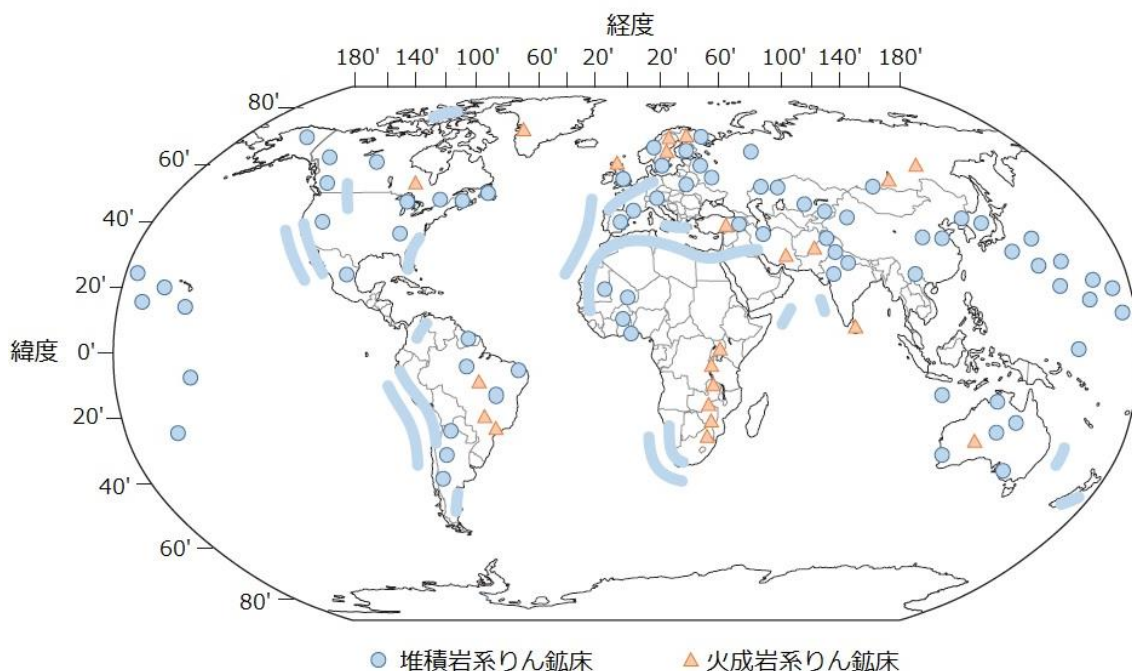


図2. 2017の時点で究明された世界のりん鉱床分布図（Pufahl & Groat より引用）

通常、鉱物の資源量はその経済的可能性に基づいて分類される。一般に埋蔵量というのは現在の価格、現在のコスト、現在の技術から評価して経済的に採掘できる資源として定義される。一方、資源量は既知の鉱床であり、現時点では経済的に採掘できないものも含まれる。但し、上述の埋蔵量と資源量は、「ジオキャパシティ」とも呼ばれる「地質の潜在力」、つまりまだ発見されていない埋蔵量と資源量のほんの一部にすぎないということである。特にりん資源はこの特徴が顕著である。

地球上のりん資源はその分布が偏っている。2022年現在、世界のりん資源の推定埋蔵量が720億トン、アフリカ、北米、アジア、中東、南米の60数ヶ国に分布しているが、最大埋蔵量を誇るのは北アフリカ地域である。モロッコ（西サハラを含む）だけで500億トンの埋蔵量が推定される。埋蔵量2～4位のエジプト、チュニジア、アルジェリアも北アフリカの国々である。この北アフリカ4国だけでは世界りん鉱石の埋蔵量の80%を占める。中国、南アフリカ、ブラジル、サウジアラビアの4ヶ国を加えると、世界りん鉱石の経済的埋蔵量の89%を占める。

2022 年の世界各国のりん鉱石採掘量と経済的に採掘できる埋蔵量は表 1 に示す。

表 1. 世界りん鉱石採掘量（2021 年と 2022 年）と経済的埋蔵量

国又は地域	採掘量（万トン／年）		経済的埋蔵量 （万トン）
	2021 年	2022 年	
中国	9,000	8,500	190,000
モロッコと西サハラ	3,810	4,000	5,000,000
アメリカ	2,160	2,100	100,000
ロシア	1,400	1,300	60,000
ヨルダン	1,000	1,000	100,000
サウジアラビア	920	900	140,000
ブラジル	600	550	160,000
エジプト	500	500	280,000
ベトナム	450	450	3,000
ペルー	420	420	21,000
チュニジア	373	400	250,000
イスラエル	243	300	6,000
セネガル	210	260	5,000
オーストラリア	250	250	110,000
アルジェリア	140	180	220,000
南アフリカ	213	160	160,000
カザフスタン	150	150	26,000
トーゴ	100	150	3,000
インド	140	140	4,600
フィンランド	99	100	100,000
ウズベキスタン	90	90	10,000
トルコ	60	80	5,000
メキシコ	48.8	45	3,000
その他の国	195	160	260,000
世界合計	22,600	22,000	7,200,000

註： 経済的埋蔵量とは、将来にわたって、経済的に採掘できるりん鉱石の埋蔵量である。

データ出所：USGS

1980 年代から中国は世界りん鉱石採掘量の首位を維持してきたが、その埋蔵量が 19 億トン、世界の第 5 位である。アメリカもりん鉱石の年間採掘量は 2,000 万トンを超え、世界第 3 位だが、埋蔵量が 10 億トンで、第 10 位である。

北アフリカ、中東、中国とアメリカのりん鉱資源は、ほとんど堆積岩として存在する。火成岩系りん鉱資源は主にブラジル、フィンランド、ロシア、南アフリカなどに存在する。また、大西洋と太平洋の大陸棚及び海底山脈にも大型のりん鉱床の存在が確認された。すでに確認された経済的に採掘できるりん鉱石埋蔵量が 720 億トン、現時点では不採算だが、将来には経済的採掘が可能となる世界のりん資源量は 3,000 億トンを超えると推定される。世界年間 2~3 億トンの採掘量からみれば、数百年の採掘に耐えるので、切迫したりん資源の不足危機がない。

三、世界主要りん鉱石産出国

1. モロッコと西サハラ

モロッコと西サハラは世界最大のりん資源を有し、すでに究明された経済的採掘可能な埋蔵量は 500 億トンである。モロッコと西サハラのりん鉱石はすべて堆積岩系フッ素りん灰石で、品質が非常に良く、 P_2O_5 含有量 12~36%である。

OCP 社がモロッコと西サハラのりん鉱石採掘権と加工権を独占する。OCP は 1920 年に設立された国営企業で、モロッコ国内にりん鉱山 4 ヶ所（Khouribga 鉱山、Yousoufia 鉱山、Benguerir 鉱山、Boucraa 鉱山）、りん酸加工とりん酸肥料工場 2 ヶ所（Jorf Lasfar りんハブ工場と Safi りんハブ工場）を有し、年間りん鉱石採掘能力 5000 万トン、実採掘量 4000 万トンである。すべて露天採掘で、良質のりん鉱石しか採掘しないため、ほとんど選鉱せず、大部分は国内にりん酸肥料やりん酸塩に加工するが、20~25%はりん鉱石のまま輸出される。

2. 中国

中国のりん資源は南西地域の雲南省、貴州省、四川省と湖北省に集中して、究明された経済的採掘可能な埋蔵量が約 19 億トン、主に堆積岩系の水酸化フッ素りん灰石で、 P_2O_5 含有量 10~35%だが、高品質のものが少なく、採掘されたりん鉱石が選鉱を経て、28~32%の精鉱として出荷する。ほかに数カ所小さな火成岩系のりん灰石鉱床もある。

中国のりん資源が世界の 2.6%しかないが、年間採掘量が世界一で、世界全体採掘量の約 40%も占めている。現状では採掘可能年数は 20 数年しかない。中国は 2020 年以降資源保護のために採掘量を減らして、外国（主にエジプトなど）からりん鉱石を輸入するようになった。

中国りん資源はほとんど国営企業に占領される。主なりん酸塩企業とりん鉱山は次の通りである。

① 雲天化： 中国雲南省にある国営企業で、傘下には 4 ヶ所のりん鉱山（昆陽りん鉱山、海口りん鉱山、普寧りん鉱山、尖山りん鉱山）を有し、すべて露天採掘で、年間採掘能力 1450 万トン、実採掘量 1200~1300 万トン。

② **貴州磷化**： 中国貴州省にある国営企業で、傘下には3ヶ所のりん鉱山（開陽りん鉱山、福泉りん鉱山、甕安りん鉱山）を有し、特に開陽りん鉱山は中国良質りん鉱石資源の80%を占める。露天採掘と坑内採掘で、年間採掘能力1700万トンを超え、実採掘量1500～1600万トン。

③ **湖北興発**： 中国湖北省にある国営企業で、傘下に5ヶ所のりん鉱山（楚峰りん鉱山、樹崆坪りん鉱山、興河りん鉱山、興昌りん鉱山、興隆りん鉱山）を有し、年間採掘能力600万トン、実採掘量400～500万トン。

3. アメリカ

アメリカりん資源の60%以上がフロリダ州にあり、残りはノースカロライナ州とアイダホ州、ユタ州にある。すべて堆積岩系のフッ素りん灰石で、品質が良く、 P_2O_5 含有量10～35%がある。現在5社が上記4州に9ヶ所のりん鉱山からりん鉱石を採掘している。主に露天採掘で、一部は坑内採掘もある。年間採掘能力3000万トンを超えたが、環境保護と採掘コストの上昇で、実採掘量が年々減少して、2022年の採掘量が2100万トンまで減少した。国内でのりん酸肥料とりん酸塩化合物を生産するためにペルーやモロッコから年間約250万トンりん鉱石を輸入している。

最大のりん酸塩メーカーはMosaic社で、所有のフロリダりん鉱山はアメリカ最大のりん鉱山で、年間採掘能力1400万トン、実採掘量1100～1200万トン。

4. サウジアラビア

サウジアラビアのりん資源が主にヨルダンに隣接している北西部のSirhan-Turayf地域に分布し、鉱脈はヨルダン側から伸びてきたものである。現在確認されたりん鉱山が6ヶ所、埋蔵量約14億トン。すべて堆積岩系のフッ素りん灰石で、 P_2O_5 含有量10～26%で、選鉱が必要である。

サウジアラビアのりん鉱石採掘権と加工権は国営のMa'aden社（Saudi Arabian Mining Company）が握っている。外資との合弁会社Ma'aden Wa'ad Al Shamal Phosphate Company（MWSPC）もあるが、Ma'aden社が60%の株式を持ち、実質にコントロールしている。年間採掘能力1000万トンを超え、実採掘量900～950万トン、すべて露天採掘である。採掘されたりん鉱石は主に国内にりん酸肥料と飼料・工業用りん酸塩化合物に加工され、一部が粗りん酸に加工して輸出される。

5. エジプト

エジプトのりん鉱石埋蔵量が28億トン、すべて堆積岩系フッ素りん灰石である。りん鉱床は主に国土中部の紅海地域、ナイル川流域と西部の砂漠地域（Kharga Abu-Tartur Dakhla）に分布し、南部のDungul-kurkur地域、北部のEash El Mallaha Area、Wadi Qena、Sinai、Wadi Araba、Bahariya Oasisにも小規模の鉱脈が見つけた。エジプトりん

鉱石の品質が良く、 P_2O_5 含有量が 22~28%、選鉱を経て、31~33%の精鉱として出荷する。

エジプトには 50 数か所のりん鉱山が開発され、年間採掘量約 500 万トン、そのうちの約 100 万トンが輸出される。主なりん鉱石の採掘会社は国営の El Nasr mining 社、国営の Misr Phosphate 社など。輸出は主に国営の El Nasr mining 社が行う。

中部 New Valley Governorate にある Abou Tartour 鉱山はエジプト最大のりん鉱山で、埋蔵量約 15 億トン、鉱床平均厚さ約 3.5m、 P_2O_5 平均含有量 25.5%、所有者は Misr Phosphate 社である。また、東部砂漠にある Sebaya 鉱山は産出したりん鉱石の品質が最良だと言われ、所有者は El Nasr mining 社である。

6. チュニジア

チュニジアのりん鉱石埋蔵量が約 25 億トン、すべて堆積岩系フッ素りん灰石である。鉱床は中部の Gafsa 地域に集中して、品質が良く、 P_2O_5 含有量 22~34%。

GCT 社はチュニジア国営会社で、国内りん鉱石の採掘権と加工権を独占する。4ヶ所のりん鉱山 (Metlaoui, Moularès, Redeyef, Kef Eddour et M'dhilla) から年間約 400 万トンのりん鉱石を採掘し、すべて露天採掘であるが、 P_2O_5 含有量 28%以上の良質なもののしか採掘されない。採掘されたりん鉱石はほとんど選鉱せず、直接 9ヶ所のりん酸工場とリン酸塩工場 (Kef Chfaier, table de Metlaoui, Kef Eddour ouest, Kef Eddour central, Om el kcheb, Redeyef, Moularès, Jellabia et Mzinda) に運び、肥料またはりん酸塩化合物に加工される。

7. ヨルダン

ヨルダンのりん鉱石埋蔵量約 10 億トン、すべて堆積岩系フッ素りん灰石である。鉱床はヨルダン南部にあり、サウジアラビアに伸びている。堆積岩系のフッ素りん灰石で、鉱床の厚さ 4~5.5m、 P_2O_5 含有量 10~26%で、選鉱が必要である。

JMPC はヨルダンの国営会社で、国内りん鉱石の採掘権と加工権を独占する。傘下に 3ヶ所の鉱山があるが、採掘されているのは Wadi Al-Abiad 鉱山だけである。露天採掘で、年間採掘量約 1000 万トン。採掘されたりん鉱石は選鉱を経て、半分は国内にりん酸に加工され、りん安と化成肥料の原料にして、残りの半分は輸出される。

8. ロシア

ロシアのりん資源埋蔵量は約 6 億トン、その 80~85%は主にフィンランドとノルウェーに隣接する北西部ムルマンスク州の kola 半島に存在する。すべて火成岩系りん灰石である。 P_2O_5 含有量 18~25%、選鉱が必要である。ただし、結晶が緻密で、選鉱が非常に容易で、選鉱された精鉱の P_2O_5 最大含有量が 39%に達し、世界最良のりん精鉱と言われる。

kola 半島に 6 ヶ所のりん鉱山があり、PhosAgro 社はそのうちの 5 鉱山（2 鉱山が露天採掘、3 鉱山が坑内採掘）を有し、年間採掘量 1,000 万トン以上である。採掘されたりん鉱石の 80%が自社内でりん安や化成肥料の生産に供し、20%が輸出される。

ほかに海底にも多量のりん資源が存在している。水深 10～500m の海底にあるりん資源は大雑把にカリフォルニア沿岸浅海りん鉱脈、ペルー～チリ浅海りん鉱脈、アメリカ南東部大陸棚りん鉱脈、モロッコ～ガーナ大陸棚りん鉱脈、ナミビア～南アフリカ浅海りん鉱脈の 5 つの鉱脈に区分される。資源量約 300 億トン、水中の採掘には技術とコストに問題があり、ほとんど手付かずの状態である。

四、世界のりん鉱石貿易

りん鉱石の年間採掘量が 2 億トンを超えたが、ほとんど産出国内で消化して、輸出に回したものは約 15%である。りん鉱石の採掘量に比べ、輸出量が少ない理由は主に三つある。一つ目はりん鉱石から肥料やりん酸塩化合物を生産するのは簡単で、設備投資も安く、国内でりん製品に加工して、付加価値を付けて輸出したほうが儲かる。二つ目はりん鉱石からりん酸を抽出する工程に多量の副産りん石膏が発生し（りん酸（ P_2O_5 ）1 トンを生産するには約 5 トンのりん石膏が発生する）、産地では掘った跡に埋め立てることができるが、輸入国ではその産廃処理が面倒である。三つ目はりん鉱石の輸出価格が安く、相対的に海運コストが高く見えるので、製品を輸入した方は採算が取れる。

CRU の統計データによれば、2018～2020 年の世界りん鉱石貿易量がそれぞれ 3110 万トン、2974 万トン、3020 万トンである。モロッコの OCP 社はトップシェアを占め、次にヨルダン、ペルー、エジプト、ロシア、アルジェリアの順である。アジアと西ヨーロッパは主な輸入地域である。図 3 は 2019 年りん鉱石輸出国のシェアを示す。図 4 は 2018～2020 年の各地域のりん鉱石輸入量を示す。

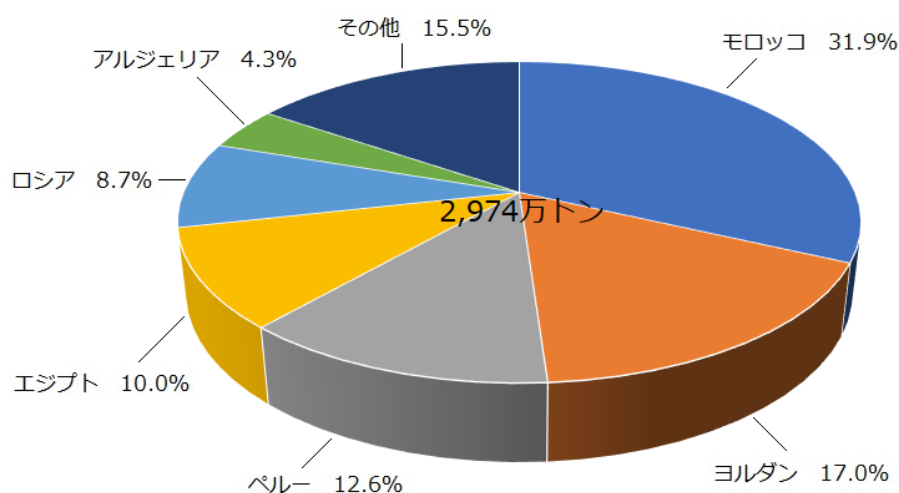


図 3. 2019 年世界主なりん鉱石輸出国のシェア
(データ出所：IFASTAT Consumption Database)

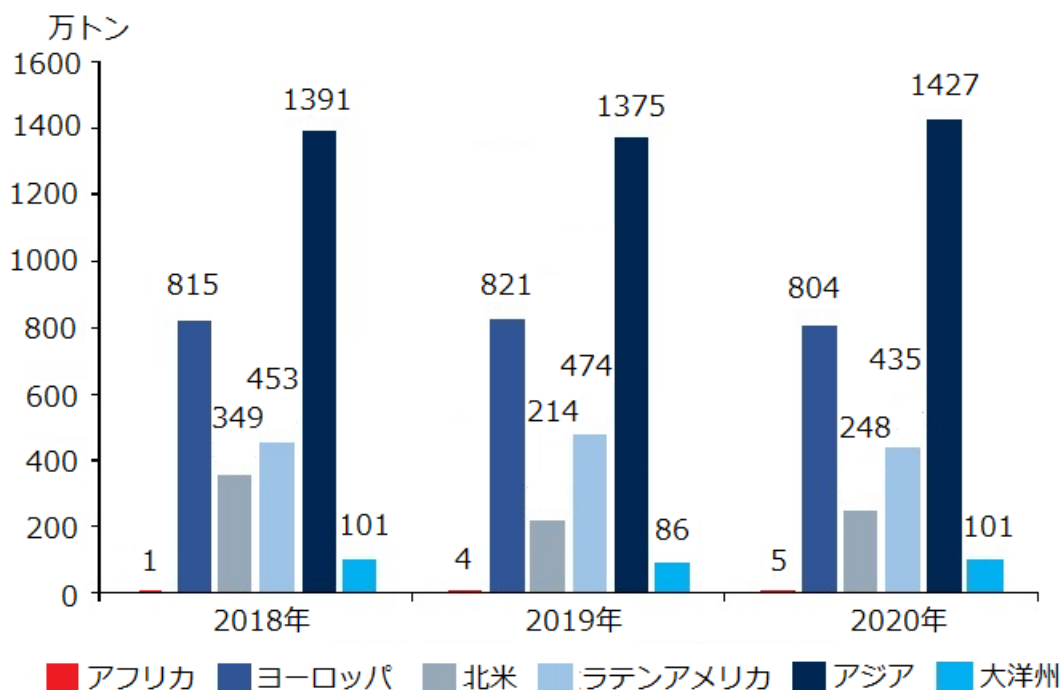


図 4. 2018～2020 年各地域のりん鉱石輸入量
(データ出所：CRU)

りん鉱石の輸出と輸入は主にりん資源の多寡に関係している。モロッコやヨルダン、エジプトはりん資源が豊富で、採掘量も多いので、輸出量も当然多くなる。ペルーは特別なケースである。アメリカはフロリダ州でのりん鉱石採掘が規制されているため、その代替としてペルーのりん鉱石を開発して、採掘されたりん鉱石の半分以上をアメリカに輸出される。

アジアのりん鉱石輸入量が抜群的に多いのはインドの旺盛な需要である。ほかにインドネシアや韓国も多量のりん鉱石を輸入している。一方、本邦のりん鉱石輸入量は 1993 年に 140 万トン記録したが、その後は急速に減少し、2017 年以降は年間 2 万トン程度まで減少した。その理由は主な用途である肥料の需要縮小と肥料メーカーが輸入りん安や輸入りん酸に切り替えていることに伴い、りん鉱石からりん酸を製造する最大手の日本磷酸（現 NC 東京ベイ株式会社）がりん酸とりん安の製造を止めたためである。

五、りん鉱石の用途

採掘されたりん鉱石の 85～90%はりん酸に加工され、約 10%は黄燐の原料となる。グアノを除き、りん鉱石をそのまま粉砕して肥料として土壌への直接施用することは非常に稀である。

りん鉱石に含まれているりんは植物に吸収可能な状態になるように化学的または物理的に加工する必要がある。通常、硫酸などの強酸を使ってりん鉱石を分解して、りん酸として抽出する。

りん酸の約 85%は肥料に供され、りん安、化成肥料、重過りん酸石灰に加工される。残りの約 10%は家畜家禽の飼料添加剤の原料にして、約 5%は工業用途である。

一部のりん鉱石はりん酸を抽出せず、化学的または物理的工程を経て、過りん酸石灰や熔りんとなる。

りん鉱石の年間採掘量が 2 億トンを超えたが、国際貿易量は約 3,000 万トンしかない理由は、りん鉱石から加工されたりん酸系肥料は養分含有量が高く、輸送が容易で、国際貿易には好都合である。2020 年の製品別の P_2O_5 消費量を図 5 に示す。

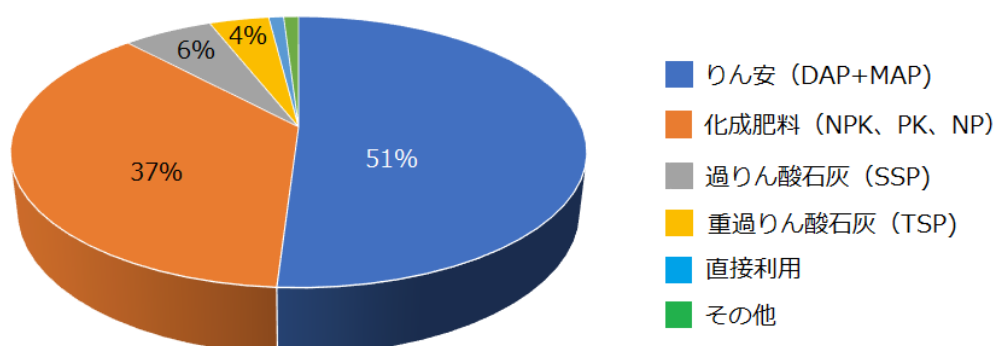


図 5. 2020 年世界りん酸 (P_2O_5) の肥料用途別消費量
(データ出所 : IFASTAT Consumption Database)